

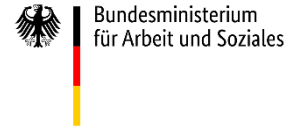
Recherche und Auswertung arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse im Bereich der digitalen Ergonomie

**Survey and evaluation of findings concerning human
factors in the sphere of digital ergonomics**

**Recherche et évaluation des avancées des sciences du
travail dans le domaine de l'ergonomie numérique**

Das Projekt „Kommission Arbeitsschutz und Normung“ wird finanziell durch das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren: Dr. Kerstin Schmidt, BioMath GmbH

Herausgeber: Verein zur Förderung der Arbeitssicherheit
in Europa e.V. (VFA)

Redaktion: Katharina von Rymon Lipinski
Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN)
– Geschäftsstelle –
Alte Heerstraße 111, 53757 Sankt Augustin
Telefon (02241) 231-3467
E-Mail: vonrymonlipinski@kan.de
Internet: <http://www.kan.de>

Veröffentlichung: Juli 2023

Inhalt Abschnitt 1

1	Zu diesem Projekt	4
1.1	Hintergrund.....	4
1.2	Ziele des Projekts.....	5
1.3	Zusammenfassung der KAN	5
1.4	Empfehlungen der KAN	6
2	About this project.....	8
2.1	Background	8
2.2	Objectives of the project	9
2.3	Summary by KAN.....	9
2.4	KAN's recommendations	10
3	À ce propos.....	12
3.1	Le contexte	12
3.2	Objectifs du projet.....	13
3.3	Résumé de la KAN	13
3.4	Recommandations de la KAN.....	14

1 Zu diesem Projekt

1.1 Hintergrund

Digitale Ergonomie wird für den Arbeitsschutz immer bedeutender. Nach Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt¹ bezeichnet "virtuelle Ergonomie [in diesem Dokument als "digitale Ergonomie" bezeichnet] die rechnergestützten Methoden und Werkzeuge zur ergonomischen Gestaltung von Produkten, Arbeitssystemen und Prozessen. Unter dem Begriff werden Software-Werkzeuge oder Teile davon zusammengefasst, mit denen arbeitswissenschaftliche Ziele verfolgt und ergonomische Gestaltungen durchgeführt werden können." Im Arbeitsschutz werden digitale Modelle und Methoden zur Planung und Beurteilung von Produkten und Prozessen in sozio-technischen Arbeitssystemen genutzt. Dazu zählen auch digitale Menschmodelle und die Erfassung, Bewertung und Darstellung von biomechanischen Daten. Mit digitalen Menschmodellen simuliert man u.a. physische Aspekte der Arbeit und kann daraus Maßnahmen für die sichere und gesundheitsgerechte Gestaltung von Arbeitsplätzen ableiten.

Ein möglicher Ausgangspunkt ist die Aufnahme von Bewegungsdaten (motion capturing), um die Koordinaten der menschlichen Gelenke im dreidimensionalen Raum erfassen zu können. Daran schließt sich die Übernahme in digitale Menschmodelle an. Je nach Aufgabenstellung können dann z.B. mit Hilfe von Modellrechnungen unterschiedliche Analysen durchgeführt werden. Neben der Beurteilung von Muskel- und Skelettbelastungen können Sichtbedingungen, Körperhaltungen und auch Bewegungsabläufe mit ihrer zeitlichen Ausprägung analysiert und beurteilt werden.

Sowohl Forschungseinrichtungen als auch Unternehmen verfügen über funktionsfähige Methoden und Werkzeuge zur Analyse, Beurteilung und Darstellung. In der Regel handelt es sich um Insellösungen, die aufgrund unterschiedlicher Datenformate untereinander oft nicht kompatibel sind. Fehlende Kompatibilität erschwert die Zusammenführung und Auswertung vorhandener Daten auch für den Arbeitsschutz.

Eine Standardisierung der Schnittstellen von Bewegungsdaten, kinematischen Modellen und Visualisierungsmethoden wäre für die betriebspraktische Anwendung hilfreich. Aufbauend hierauf könnten dann arbeitswissenschaftliche Beurteilungs-

¹ Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt: "Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle", 2016

und Bewertungsverfahren in einem weiteren Entwicklungsschritt harmonisiert werden.

Mittels von in der Normung definierten Schnittstellen und Datenformaten könnte die Nutzung bzw. Zusammenführung und Auswertung von unterschiedlichen Ansätzen verbessert werden. Insgesamt würde damit ein Beitrag zur Verbesserung der digitalen Methoden zur menschengerechten Arbeitsgestaltung geleistet werden. Das ist sinnvoll, da es ohne eine normative Festlegung weiterhin unterschiedliche Herangehensweisen geben wird, die eine Vergleichbarkeit der Daten und deren Interpretation erschwert.

Ein weiterer Vorteil einheitlicher Schnittstellen und Datenformate wäre es außerdem, dass kinematische Daten aus verschiedenen Quellen zusammengefügt werden können und für übergreifende Auswertungen im Arbeitsschutz genutzt werden könnten.

Zahlreiche Angebote finden sich bereits auf dem Markt, allerdings mangelt es derzeit noch an genormten und untereinander kompatiblen Datenformaten und Strukturen. 2022 hat die KAN daher ein Projekt zum Thema „Recherche und Auswertung arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse im Bereich der digitalen Ergonomie“ durchführen lassen.

1.2 Ziele des Projekts

Ziele dieses Projektes waren:

- Eine Bestandsaufnahme und Auswertung wissenschaftlicher Publikationen. Es galt herauszustellen, welche arbeitswissenschaftlichen Erkenntnisse in Bezug auf digitale Menschmodelle und die digitale Erfassung, Bewertung und Darstellung von biomechanischen Daten als gesichert anzusehen sind. Der Aspekt der Datenformate und Schnittstellen stand hierbei im Fokus.
- Die Vorlage für einen technischen Report DIN/TR zu erstellen, in dem der derzeitige Ausgangspunkt und Ansätze zur Harmonisierung einheitlicher Schnittstellen und Datenformate beschrieben werden.
- Für die Forschung weiterführende arbeitsschutzrelevante Fragestellungen herauszuarbeiten.

1.3 Zusammenfassung der KAN

Das Projekt wurde als Scoping Review durchgeführt. Diese Methode hat das Ziel, Orientierung über den Stand der Forschungsliteratur zu einem Themenfeld zu geben. Dabei werden u.a. Schlüsselkonzepte und Forschungslücken erfasst.

Der Bericht gibt einen Überblick über digitale Menschmodelle (digital human modelling; DHM-Modelle) und deren Eigenschaften und Möglichkeiten. Zudem wurde untersucht, welche Systeme zur Bewegungserfassung in Studien untersucht wurden (motion capture; MoCap-Systeme). Die wissenschaftlichen Publikationen wurden mit dem Fokus auf Schnittstellendefinitionen und Datenformate analysiert. Dabei ging es bei diesem Projekt vorrangig um Möglichkeiten zum Datenaustausch zwischen DHM-Systemen untereinander, zwischen MoCap-Systemen untereinander sowie zwischen DHM- und MoCap-Systemen.

Ergebnisse sind u.a.:

- In Bezug auf anthropometrische Maße greifen DHM-Systeme auf unterschiedliche Datenbanken zurück, die verschiedene Bevölkerungsgruppen abbilden. Außerdem können die Daten in den Datenbanken unterschiedlich gruppiert und/oder aufgeschlüsselt sein. Die Qualität der Daten bestimmt auch die Qualität der DHM-Systeme
- Bei Systemen zur Bewegungserfassung gibt es kein einheitliches Vorgehen bei der Datenerfassung.

In zukünftigen Forschungsprojekten sollten folgende Punkte näher beleuchtet werden (s. dazu auch 1.4. Empfehlungen der KAN):

- Für den Austausch von Daten innerhalb von DHM-Systemen wäre es sinnvoll, ein herstellernerutrales, gut dokumentiertes, standardisiertes Format zu haben. Für eine Echtzeitsimulation ist es vorteilhaft, ein kleines Dateiformat zu wählen und nicht ein sehr detailliertes.
- Begriffsdefinitionen z.B. für bestimmte Teile eines Menschmodells sollten festgelegt werden.
- Da es für die Eigenschaften und Konfiguration von Menschmodellen verschiedene Ansätze gibt, wären Festlegungen zu einer der Vergleichbarkeit zuträglichen Struktur der Modelle wichtig.
- Die Schnittstellen sollten für unterschiedliche Detailgrade kompatibel sein, um eine breite Verwendbarkeit der Daten für den Arbeitsschutz zu ermöglichen.

Die Ergebnisse wurden von der Projektnehmerin zusätzlich in Form eines Technischen Reports aufbereitet, damit die Ergebnisse dieses Projekts der Normung zugeführt werden können.

1.4 Empfehlungen der KAN

Die **KAN-Geschäftsstelle** wird beauftragt,

- die Ergebnisse der Studie in den relevanten Institutionen und Gremien (z.B. den Fachbereichen und Sachgebieten der DGUV und den relevanten DIN-Normenausschüssen) bekannt zu machen,
- die Ergebnisse über die Medien der KAN (z.B. KANBrief, KANMail, Social Media, KAN-Internetseite) zu verbreiten,
- den Entwurf für einen DIN/TR als Vorschlag bei DIN einzureichen.

Die KAN bittet **DIN**

- die Entwicklung eines möglichen DIN/TR im relevanten Arbeitsausschuss bei DIN zu unterstützen
- zu prüfen, inwiefern die internationalen Normen ISO/IEC 19774-1 "Informationstechnik - Computergrafik und Bildverarbeitung - Teil 1: Architektur" und ISO/IEC 19774-2 " Informationstechnik - Computergrafik und Bildverarbeitung - Humanoide Animation (H-Amin) - Teil 2: Motion capture" hilfreich sind und ob sie von Deutschland übernommen werden könnten
- den Kontakt zu VDI hinsichtlich VDI 4499-4 " Digitale Fabrik - Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik" zu intensivieren, um Doppelarbeit zu vermeiden und Synergieeffekte zu nutzen

Die KAN unterstreicht, dass es bei der Formulierung von Forschungszielen grundlegend ist, dass der Vielfalt der körperlichen Gegebenheiten der arbeitenden Menschen Rechnung getragen wird. Restriktionen dieser Vielfalt aus technischen Gründen müssen detailliert beschrieben werden, so dass klar wird, in welchem Maß sie einschränkend wirken.

2 About this project

2.1 Background

Digital ergonomics is becoming increasingly relevant to occupational safety and health. Bullinger-Hoffmann and Mühlstedt² refer to "virtual ergonomics [termed "digital ergonomics" in this document] to describe computer-based methods and tools for the ergonomic design of products, work systems and processes. The term covers software tools and their components that can be used to attain objectives in the sphere of human factors, and for ergonomic design." In occupational safety and health, digital models and methods are used to plan and assess products and processes in sociotechnical work systems. They include digital human models and the capture, evaluation and presentation of biomechanical data. One use of digital human models is the simulation of physical aspects of work to enable measures to be identified for safe and healthy job design.

A possible starting point is motion capturing, by which the three-dimensional coordinates of human joints can be recorded. This is followed by transfer of these coordinates to digital human models. Depending on the task, different analyses can then be performed, for example by means of model calculations. These include analysis and assessment of visibility conditions, body postures and movement processes and their respective progressions over time, as well as assessments of stresses upon the musculoskeletal system.

Enterprises and research institutes alike possess suitable methods and tools for performing analyses, assessments and presentations. These are generally standalone applications, often incompatible with each other owing to their different data formats. Poor compatibility also makes it difficult to merge and interpret the available data for occupational safety and health purposes.

Standardization of the interfaces of motion data, kinematic models and visualization methods would facilitate the use of these models in industry. In turn, methods for the assessment and evaluation of human factors could then be harmonized in a further development step.

Interfaces and data formats defined in standards could improve the application, merging and interpretation of results of different approaches. Overall, this would help to improve digital methods for the human-centric design of work. This should

² Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle, 2016

be welcomed, because without normative specifications, different approaches will continue to be taken, making comparison and interpretation of data difficult.

Another advantage of standardized interfaces and data formats would be that kinematic data from multiple sources could be merged and used for generic evaluations in occupational safety and health.

Numerous solutions are already available on the market. Standardized, mutually compatible data formats and structures are however still lacking. In 2022, KAN therefore commissioned a project surveying and evaluating findings concerning human factors in the sphere of digital ergonomics.

2.2 Objectives of the project

The goals of the project were:

- Production of a scoping review and evaluation of scientific publications. The aim was to highlight what findings concerning human factors relating to digital human models and the digital capture, evaluation and presentation of biomechanical data can be considered validated. The focus here lay on the aspect of data formats and interfaces.
- Preparation of a draft for a DIN/TR technical report describing the current situation and approaches to harmonizing interfaces and data formats.
- Identification of further issues relevant to occupational safety and health for research purposes.

2.3 Summary by KAN

The project took the form of a scoping review. This method aims to provide orientation on the current progress of the research literature for a particular sphere. It addresses such issues as key concepts and gaps in research.

The report provides an overview of digital human models (DHMs), their characteristics, and what they are capable of. In addition, the authors identified the motion capture (mocap) systems that had been examined in studies. The scholarly publications were analysed; the focus lay here on interface definitions and data formats. The project primarily addressed the possibilities for data exchange between different DHM systems, between different mocap systems, and between DHM and mocap systems.

Among the findings were the following:

- DHM systems retrieve anthropometric data from multiple databases. These represent different population groups, and the data they contain may also differ

in how they are grouped and/or broken down. The quality of the data also determines the quality of the DHM systems

- No standard procedure exists for the capture of data in motion capture systems.

Future research projects should examine the following points in greater detail (see also 1.4, KAN's recommendations):

- A well-documented, standardized non-proprietary format would be advantageous for the exchange of data within DHM systems. For real-time simulation, small rather than highly detailed file formats are preferable.
- Terminology, such as that referring to specific parts of a human model, should be defined.
- Since multiple approaches exist for the properties of human models and their configuration, specifications for structuring the models in a way that promotes comparability are important.
- Interfaces should be compatible for different levels of detail, to permit use of data on a wide scale for occupational safety and health purposes.

In addition, the results were used by the project contractor to produce a technical report, through which they can be submitted to standardization activity.

2.4 KAN's recommendations

The **KAN Secretariat** is mandated:

- To make the results of the study known to the relevant institutions and committees (such as the DGUV's expert committees and subcommittees and the relevant DIN standards committees)
- To disseminate the results through the KAN media (KANBrief, KANMail, social media, KAN website)
- To submit the draft for a DIN/TR as a proposal to DIN

KAN requests that **DIN**:

- Support development of a possible DIN/TR in the relevant working committee at DIN
- Examine to what extent the international standards ISO/IEC 19774-1, Information technology. Computer graphics, image processing and environmental data representation. Humanoid animation (H-Anim) architecture, and ISO/IEC 19774-2, Information technology. Computer graphics, image processing and environmental data representation. Humanoid animation (H-Anim) motion data animation, are helpful and whether they could be adopted by Germany

- Step up contact with VDI regarding VDI 4499-4, Digital factory – Ergonomic representation of humans in the digital factory, to avoid duplication of effort and exploit synergies

KAN emphasizes that the formulated research objectives must give consideration to the diversity in physical characteristics of working people. Constraints imposed upon this diversity for technical reasons must be described in detail to indicate to what extent they are restrictive.

3 À ce propos

3.1 Le contexte

L'ergonomie numérique est appelée à jouer un rôle de plus en plus important pour la sécurité et la santé au travail (SST). Selon Bullinger-Hoffmann et Mühlstedt³, « on entend par "ergonomie virtuelle" [désignée dans ce document par "ergonomie numérique"] les méthodes et outils assistés par ordinateur utilisés pour la conception ergonomique de produits, systèmes de travail et processus. Ce terme regroupe les outils logiciels ou les parties de ceux-ci qui permettent de poursuivre les objectifs de la science du travail et de réaliser des conceptions ergonomiques. » Dans le domaine de la SST, les modèles et méthodes numériques sont utilisés pour planifier et évaluer des produits et processus dans les systèmes de travail socio-techniques. Ceci inclut les modèles humains numériques, ainsi que la saisie, l'évaluation et la représentation de données biomécaniques. Les modèles humains numériques servent, entre autres, à simuler les aspects physiques du travail et d'en déduire des mesures permettant de concevoir des postes de travail sûrs et sains.

Une approche possible consiste à enregistrer les données relatives aux mouvements (la capture de mouvements) pour pouvoir saisir les coordonnées des articulations humaines dans un espace tridimensionnel, opération suivie du transfert de ces coordonnées dans des modèles humains numériques. Selon la tâche à accomplir, il est alors possible d'effectuer diverses analyses, par exemple à l'aide de modèles de calcul. Ceci permet d'analyser et d'évaluer non seulement les charges musculo-squelettiques, mais aussi les conditions de visibilité, les postures et les mouvements, avec leur caractéristique temporelle.

Tant les instituts de recherche que les entreprises disposent de méthodes et outils opérationnels permettant l'analyse, l'évaluation et la visualisation. Il s'agit toutefois généralement de solutions isolées qui, souvent, ne sont pas compatibles entre elles en raison de formats de données différents. Pour la SST aussi, cette absence de compatibilité rend difficile le regroupement et l'évaluation des données existantes.

Une standardisation des interfaces entre les données de mouvements, les modèles cinématiques et les méthodes de visualisation s'avérerait utile pour une utilisation pratique en entreprise. Ceci permettrait, par la suite, d'harmoniser les méthodes d'évaluation et de valorisation scientifiques.

³ Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt : "Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle", 2016

Il serait possible de faciliter l'utilisation, le regroupement et l'analyse d'approches différentes grâce à des interfaces et formats de données définis dans la normalisation. Ceci contribuerait, d'une manière générale, à améliorer les méthodes numériques de conception du travail à dimensions humaines. Cela semble évident, car, sans définition normative, il continuera d'y avoir des approches différentes, ce qui rend difficile une comparaison des données et leur interprétation.

Des interfaces et formats de données standardisés présenteraient un autre avantage en permettant de regrouper des données cinématiques provenant de différentes sources, et de les utiliser pour des évaluations transversales dans le domaine de la SST.

De nombreuses offres sont déjà disponibles sur le marché, mais ce qui fait encore défaut, ce sont des formats de données et des structures normalisés et compatibles entre eux. C'est pourquoi, en 2022, la KAN a fait réaliser une étude consacrée à la recherche et à l'évaluation des avancées des sciences du travail dans le domaine de l'ergonomie numérique.

3.2 Objectifs du projet

Les objectifs de ce projet étaient les suivants :

- Recenser et évaluer les publications scientifiques, le but étant de déterminer lesquelles, parmi les avancées des sciences du travail, peuvent être considérées comme validées concernant les modèles humains numériques et la saisie numérique, l'évaluation et la représentation numériques des données biomécaniques. L'accent était mis en l'occurrence sur l'aspect des formats de données et des interfaces.
- Rédiger un projet de rapport technique DIN/TR décrivant l'état des lieux et les approches visant à harmoniser des interfaces et des formats de données uniformes.
- Définir, pour la recherche, des questions pertinentes à approfondir concernant la SST.

3.3 Résumé de la KAN

Le projet a été mené sous forme de "scoping review". Cette méthode a pour but de dresser un état des lieux sur la bibliographie de la recherche sur une thématique donnée, en recensant notamment les concepts clés et les lacunes de la recherche.

Le rapport donne un aperçu des modèles humains numériques (digital human modelling - modèles DHM), de leurs caractéristiques et de leurs possibilités. Il y est également précisé quels systèmes de capture de mouvement (systèmes MoCap) ont fait l'objet d'études. Les publications scientifiques ont été analysées, l'accent

étant mis sur les définitions des interfaces et les formats de données. Le principal enjeu de ce projet était d'étudier les possibilités d'échange de données des systèmes DHM entre eux, des systèmes MoCap entre eux, et entre les systèmes DHM et les systèmes MoCap.

L'étude a mis notamment en évidence les résultats suivants :

- Concernant les mesures anthropométriques, les systèmes DHM font appel à différentes bases de données, qui représentent des groupes de population différents. De plus, les données peuvent être regroupées et/ou ventilées différemment d'une base de données à l'autre. La qualité des données détermine également la qualité des systèmes DHM.
- Concernant les systèmes de capture du mouvement, il n'existe pas de procédure uniforme pour la collecte des données.

Dans les futurs projets de recherche, il conviendra d'examiner de plus près les aspects suivants (voir aussi à ce sujet le point 1.4 Recommandations de la KAN) :

- Pour l'échange de données au sein des systèmes DHM, il serait utile de disposer d'un format standardisé, bien documenté et non lié à tel ou tel fabricant. Pour une simulation en temps réel, il est préférable de choisir un petit format de données plutôt qu'un format très détaillé.
- Il serait bon de s'accorder sur la définition de termes donnés, notamment pour certaines parties d'un modèle humain.
- Étant donné qu'il existe différentes approches concernant les caractéristiques et la configuration de modèles humains, il serait important de définir pour les modèles une structure qui en favorise la comparabilité.
- Il faudrait que les interfaces soient compatibles pour différents niveaux de détail, afin de permettre une vaste utilisation des données pour la SST.

Les résultats ont été en outre rédigés par l'exécutant du projet sous forme de rapport technique, ce qui permettra d'en communiquer les conclusions aux organismes de normalisation.

3.4 Recommandations de la KAN

Il est demandé au **Secrétariat de la KAN** :

- de faire connaître les résultats de l'étude aux institutions et organismes concernés, notamment aux commissions sectorielles et aux sous-sections spécialisées de la DGUV, ainsi qu'aux comités de normalisation concernés du DIN,
- de diffuser les résultats par le biais des médias de la KAN (KANBrief, KANMail, réseaux sociaux, page web de la KAN),

- de soumettre au DIN le projet de DIN/TR en tant que proposition.

La KAN demande au **DIN** :

- d'apporter son appui à l'élaboration d'un DIN/TR éventuel au sein du comité de travail concerné du DIN,
- de vérifier dans quelle mesure les normes internationales ISO/IEC 19774-1 "Technologies de l'information — Infographie, traitement de l'image et représentation des données environnementales — Partie 1: Architecture pour l'animation humanoïde" et ISO/IEC 19774-2 "Technologies de l'information — Infographie, traitement de l'image et représentation des données environnementales — Partie 2: Animation utilisant des données de mouvement pour l'animation humanoïde (HAnim)" peuvent s'avérer utiles et peuvent être adoptées en Allemagne,
- d'intensifier le contact avec le VDI à propos de la VDI 4499-4 concernant l'usine numérique et la représentation ergonomique de l'homme dans l'usine numérique, et ce afin d'éviter les doublons et de mettre à profit les effets de synergie.

La KAN souligne le fait que, lors de la formulation des objectifs de la recherche, il est essentiel de tenir compte de la diversité des caractéristiques physiques des travailleurs. Toute restriction à cette diversité pour des raisons techniques devra être décrite en détail, de manière à exposer clairement en quoi elle a un effet limitatif.



Recherche und Auswertung arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse im Bereich der digitalen Ergonomie

Bericht

vorgelegt von

BioMath GmbH

Angewandte Statistik und Informatik in den Lebenswissenschaften

Friedrich-Barnewitz-Str. 8
18119 Rostock-Warnemünde

Flughafenstr. 52a (Haus C)
22335 Hamburg

Tel: +49 (0) 381 375 661 0
Fax: +49 (0) 381 375 661 18

Tel: +49 (0) 40 53299 358
Fax: +49 (0) 40 53299 100

vertreten durch:

Dr. Kerstin Schmidt

E-Mail: kerstin.schmidt@biomath.de

Inhaltsverzeichnis

Teil I - Ergebnisse.....	3
Digitale Ergonomie	3
Digitale Menschmodelle (Digital Human Models DHM)	4
Anthropometrie	9
Bewegungserfassung (Motion Capture Systems).....	11
Umgebungen (Environments).....	14
Arbeitswissenschaftliche Verfahren	15
Dateiformate	19
Dateiformate für Daten von 3D-Objekten (Volumenkörpern)	19
Dateiformate für kinematische und kinetische Daten	20
Dateiformate umfassender Daten	23
Schnittstellen	24
Aspekte des Datenaustauschs	24
Anthropometrie	25
Skalierung	25
Biomechanik (Kinematik und Kräfte).....	25
Verfahren des Datenaustauschs.....	26
Schnittstellen zwischen DHM.....	26
Pooling/Master Modell.....	29
Import von MoCap-Daten in DHM.....	31
Standards	34
Umfang der Standardisierung.....	34
Stand der Standardisierung	34
Akteure und Konferenzen.....	38
Zusammenfassung	39
Hintergrund	39
Probleme	39
Lösungsvorschläge	40
Teil II – Hintergrund, Methodik	42
Hintergründe	42
Vorgehensweise	43
Schritt 1 Definition der Forschungsfrage	43
Schritt 2 Systematische Suche nach relevanten Studien	44
Schritt 3 Studienselektion nach vordefinierten Ein-/Ausschlusskriterien	45
Schritt 4 Datenextraktion und -verarbeitung	47
Schritt 5 Zusammenstellung, Synopse und Bericht der Ergebnisse.....	47
Identifizierte Quellen	48
Übersichtsarbeiten	48
Beschreibung von Dateiformaten.....	48
Standards und Richtlinien	50
Datenaustausch	51
Identifizierte Fragestellungen für mögliche weiterführende Forschung.....	53
Literaturverzeichnis	54

Teil I - Ergebnisse

Digitale Ergonomie

DIN EN ISO 6385:2004-05 (DIN EN ISO 6385, 2004) definiert Digitale Ergonomie als: „ein Oberbegriff für digitale Modelle und Methoden zur Planung, Realisierung und laufenden Verbesserung von Produkten und sozio-technischer Arbeitssysteme. Dabei gilt der Mensch als Hauptfaktor und integraler Bestandteil des gebrauchstauglich bzw. sicher, gesund und wettbewerbsfähig zu gestaltenden Produktes oder Systems.“ Digitale Ergonomie unterstützt bei der Gestaltung sowohl gebrauchstauglicher Produkte (virtuelle Produktplanung, „product engineering“, „usability“) als auch sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeitsprozesse (virtuelle Prozessplanung, „manufacturing engineering“) und leistet einen wichtigen Beitrag zum präventiven Arbeitsschutz (Wischniewski, 2013). Die rechnergestützte Ergonomie unterstützt die Produktentwicklung im Hinblick auf die Berücksichtigung ergonomischer Anforderungen, wie z. B. aus gesetzlichen Auflagen, und auf die Eignung des Produktes für eine Zielpopulation. Auch in der Prozessentwicklung hilft die digitale Ergonomie insbesondere bei der Berücksichtigung bestehender Anforderungen an die Arbeitssysteme und -abläufe. Mitarbeiterspezifische Merkmale können bei der Gestaltung von Produkt- und Arbeitssystemen stärker berücksichtigt und besser mit der Arbeitsbelastung in Einklang gebracht, körperlichen Belastungen können reduziert werden (Offensive Mittelstand, 2018).

Im Mittelpunkt digitaler Ergonomie stehen Digitale Menschmodelle (DMM bzw. Digital Human Models DHM), die in einer Umgebung platziert und dann manipuliert werden, um arbeitswissenschaftliche Kenngrößen zu ermitteln (Abbildung 1).

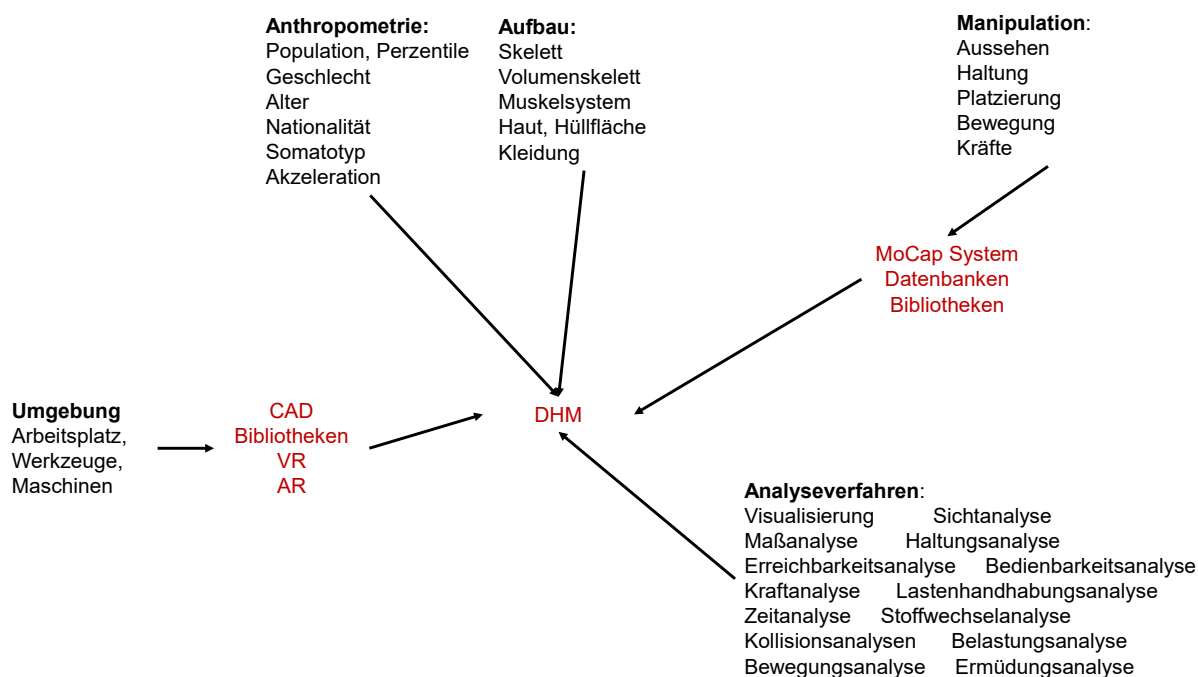


Abbildung 1 Zusammenspiel verschiedener Komponenten in der digitalen Ergonomie

Die einzelnen Komponenten (CAD, DHM, MoCap) weisen jeweils eine enorme Vielfalt an Softwarelösungen unterschiedlicher Entwickler auf, was es schwierig macht, Ergebnisse zu verbreiten und zu vergleichen oder Forschungsideen auszutauschen. Zum Verständnis der Hürden und Probleme für eine mögliche Standardisierung von Schnittstellen und Dateiformaten wird diese Vielfalt im Folgenden aufgezeigt und systematisiert.

Digitale Menschmodelle (Digital Human Models DHM)

Auf die Frage „Was ist DHM?“ kann es mehr als eine Antwort geben, da der Begriff je nach Interessensgebiet unterschiedliche Konnotationen und Nuancen aufweist. Selbst im technischen Bereich können DHM unterschiedliche Bedeutungen haben - von Computer-Avataren bis hin zu anatomischen Modellen (Demirel, Ahmed & Duffy, 2022). Im Gegensatz zu früheren traditionellen Definitionen, die sich vorwiegend auf Softwareanwendungen und ergonomische Bewertungen konzentrieren, definieren Demirel et al. (2022) DHM in einer ganzheitlichen Sichtweise, die Perspektiven auf System- und Designebene als Teil der Bereichsdefinition fördert:

„DHM sind ein Forschungsbereich, der sich auf die Synthese und Anwendung von Theorien, Prinzipien, Methoden und Technologien aus einem breiten Spektrum von Disziplinen konzentriert, die eine computergestützte Visualisierung, Modellierung und Simulation von Mensch-System-Interaktionen ermöglichen, um die Vorhersage und Optimierung von Wohlbefinden und Leistung zu erleichtern.“

Seit den 1960er Jahren wurden etwa 150 unterschiedliche, kommerziell erhältliche oder wissenschaftliche DHM mit heterogenen Eigenschaften, Fähigkeiten, zugrundeliegenden Algorithmen, anthropometrischen und biomechanischen Datensätzen für unterschiedliche Zwecke entwickelt (Mühlstedt, 2016a; Paul & Wischniewski, 2012). Dies erschwert sowohl den Vergleich von Ergebnissen als auch die Übertragung validierter Forschungskonzepte in kommerziell vertriebene DHM-Software-Systeme, was deren Nutzungsbasis verbreitern würde. Bullinger-Hoffmann und Mühlstedt (2016) beschreiben in Kapitel 4 ihres Buches „Homo sapiens digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschenmodelle“ 90 arbeitswissenschaftliche und arbeitswissenschaftlich nutzbare digitale Menschenmodelle. Daneben existieren weitere Verzeichnisse oder Reviews digitaler Menschenmodelle (Demirel et al., 2022; Duffy, 2009; Wolf, Miehlung & Wartzack, 2020).

Bubb (2019) unterscheidet vier Bereiche von DHM (Abbildung 2):

- anthropometrische Modelle (z.B. JACK, Safework/Human Builder, RAMSIS, SANTOS)
- biomechanische Modelle (z.B. ADAMS, SIMPACK, Dynamicus, CASIMIR, AnyBody Modelling System)
- kognitive Modelle (z.B. ACT-R, Soar, QN-MHP, PARDIC, PELOPS)
- physiologisch-medizinische Modelle (z.B. HUGO, Cosmodrive).

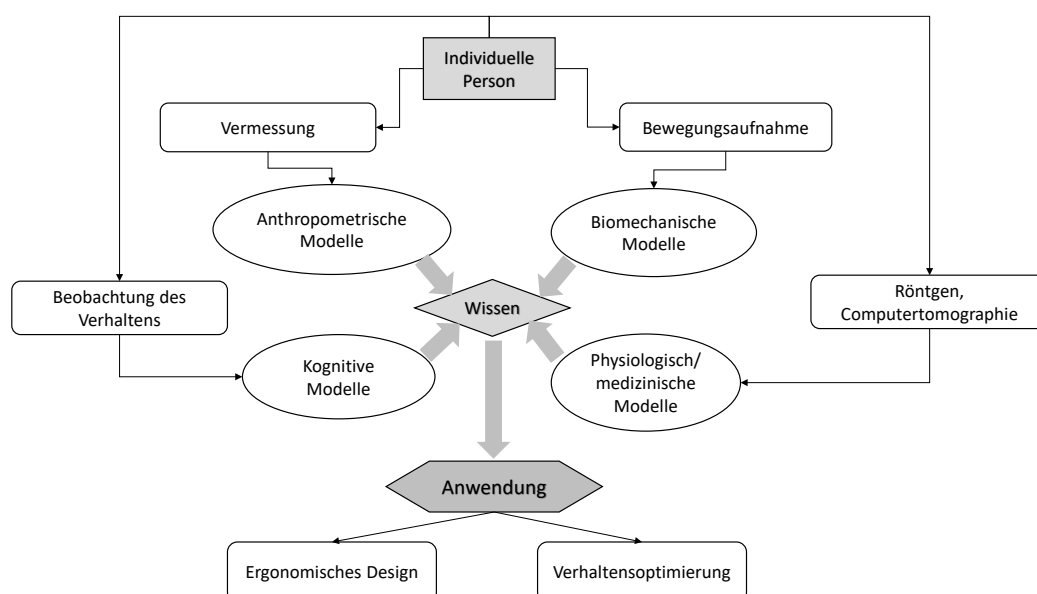


Abbildung 2 Überblick zu Generierung und Anwendung von DHM nach Bubb (2019)

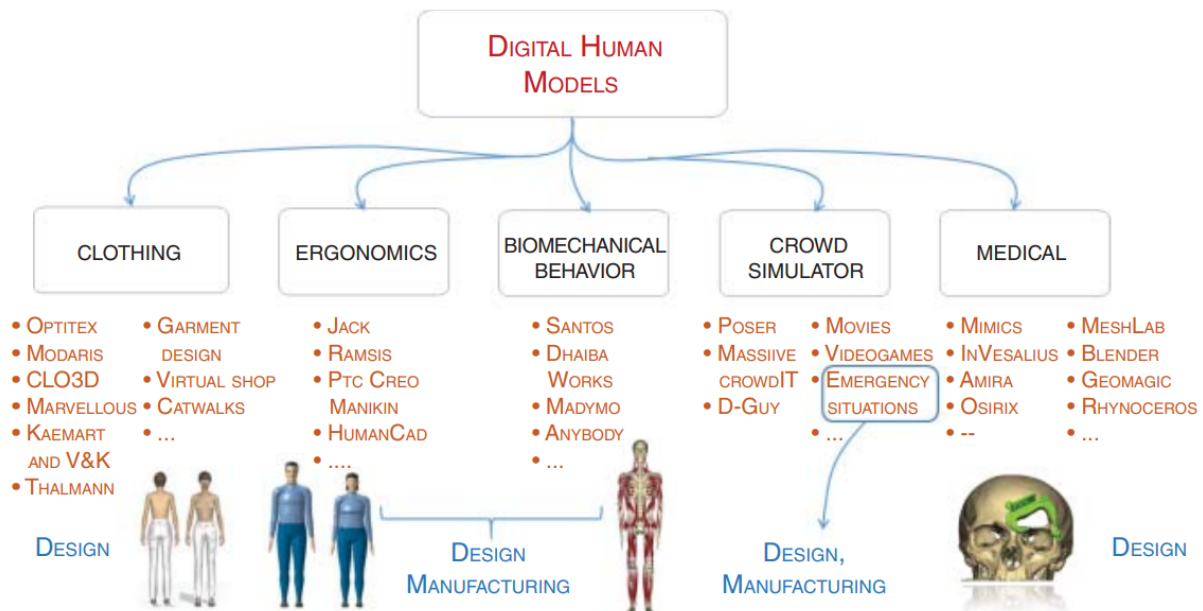


Abbildung 4 Kategorien von DHM nach Regazzoni und Rizzi (2019), Anwendungsgebiete und Beispiele

Mühlstedt (2016c) teilt in arbeitswissenschaftliche und sonstige digitale Menschmodelle ein, wobei letztere teilweise auch in Anwendungsgebieten genutzt werden, die nicht arbeitswissenschaftlich im engeren Sinn sind, die aber dennoch ergonomische Problemstellungen aufweisen bzw. Analysen erlauben.

Einige weit verbreitete DHM sind in Tabelle 1 aufgeführt, die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern führt Modelle auf, die in bei dieser Recherche identifizierten Studien beschrieben/eingesetzt wurden.

Tabelle 1 Auflistung Digitaler Menschmodelle

Kurzname	Bereich	Entwickler/ Anbieter	Land	Webseite	Plattform/ Systemintegration
3D Human Model	anthropometrisch	Delft University of Technology, SLIM-DESIGN	NL	https://3dhumanmodel.com/	Solidworks, CREO, CATIA and NX
3DSSPP (3D Static Strength Prediction Program)	anthropometrisch	University of Michigan, seit 2020 VelocityEHS Humantech	US	https://www.ehs.com/solutions/ergonomics/3d-sspp/	Stand-alone oder als AutoCAD-Integration
AMS (AnyBody Modeling System)	biomechanisch	AnyBody Technology A/S	DK	www.anybody.com	Stand-alone Software
Apolinex	anthropometrisch	Rafal Michalski	PL	http://rafal-michalski.com/software-apolinex-description.php	AutoCAD
ARMO	biomechanisch	G-sport, Inc.	JP	https://www.gsport.co.jp/p_l_armo_e.html	Stand-alone Software
BoB (Biomechanics of Bodies)	biomechanisch	BoB Biomechanics Ltd	UK	https://www.bob-biomechanics.com/	Stand-alone Software
CADHUMAN	anthropometrisch	Cadhuman		https://www.cadhuman.com/	Solidworks, Catia, Autodesk Inventor, creo Pro Engineer, Solid Edge, UGS NX
CASIMIR	anthropometrisch	Wölfel Engineering GmbH + Co. KG	DE	https://www.woelfel.de/	E-Preprocessor HyperMesh®, FE-Solver SIMULIA Abaqus
CharAT (Character-Animations-Tool)	anthropometrisch	ESI Software Germany GmbH (ehem. IC.IDO/ VHE GmbH)	DE	https://www.esi-group.com/products/virtual-reality	Stand-alone Software

Creo Manikin	anthropometrisch	PTC Inc.	US	http://www.creomanikin.com/	CREO
DPE (Delmia Process Engineer Human)	anthropometrisch	Dassault Systems	FR	https://www.3ds.com/products-services/delmia/	Delmia Process Engineer
Dynamicus	biomechanisch	Institut für Mechatronik e. V.	DE	https://www.ifm-chemnitz.de/produkte/mensch-technik-interaktion/alaskadynamicus/	alaska/ModellerStudio
Ema (Editor menschlicher Arbeit)	anthropometrisch	imk automotive GmbH	DE	www.imk-automotive.de	Stand-alone, modularer Programmkern für verschiedene Plattformen
Human Builder	anthropometrisch	Dassault Systèmes	FR	http://catiadoc.free.fr/online/CATI-Afr_C2/hbrugCATIA-frs.htm	CATIA, ENOVIA, DELMIA
HumanCAD	anthropometrisch	NexGen Ergonomics	CA	http://www.nexgenergo.com/ergonomics/humancad.html	Stand-alone, SolidWorks
HumanShape	anthropometrisch	University of Michigan	UC	http://humanshape.org/	Stand-alone Software
IMMA (Intelligently Moving Manikin)	biomechanisch	flexstructures GmbH	DE	https://flexstructures.de/produkte/ips-imma/	Stand-alone Software
Jack(/Jill)	anthropometrisch	Siemens PLM	DE/ US	https://www.simsol.co.uk/products/human-factors-simulation/jack/	Einzelsoftware Classic Jack (auch Jack stand-alone), Integrationen in Tecnomatix, NX (als NX Human), Teamcenter (als VIS Jack)
LifeMOD	biomechanisch	LifeModeler, Inc.	US	www.lifemodeler.com/products/lifemod	MD ADAMS
MakeHuman	anthropometrisch	MakeHuman Community	-	http://www.makehumancommunity.org/	Open Source Tool
Mixamo	anthropometrisch	Adobe Systems Incorporated	US	https://www.mixamo.com/#/	Stand-alone Software
OpenSim (OpenSimulator)	biomechanisch	National Center for Simulation in Rehabilitation Research	US	https://opensim.stanford.edu/	Open Source Tool
Poser	anthropometrisch	Bondware Inc.	US	https://www.poser-software.com/	Stand-alone Software
RAMSIS (Rechnergestütztes Anthropologisch-Mathematisches System zur Insassen-Simulation)	anthropometrisch	Human Solutions GmbH	DE	https://www.humansolutions.com/de/produkte/ramsis-allgemein/index.html	stand-alone, CATIA, Tecnomatix, Autodesk
SAMMIE (System for Aiding Man-machine Interaction Evaluation)	anthropometrisch	SAMMIE CAD Ltd.	UK	https://www.lboro.ac.uk/microsites/lids/sammie/dhm.html	Stand-alone Software
Santos	anthropometrisch	SantosHuman Inc.	US	www.santoshumaninc.com	Stand-alone Software
SIMM (Software for Interactive Musculoskeletal Modeling)	biomechanisch	Musculographics	US	-	Stand-alone Software
SmartBody	anthropometrisch	University of Southern California/ Unity Technologies	US	https://smartbody.ict.usc.edu/	Stand-alone Software
ViveLab	anthropometrisch	ViveLab Ergo Plc.	HU	https://www.vivelab.cloud/software	Stand-alone Software

Einige dieser DHM existieren als eigenständige Lösungen, während andere direkt in CAD- und PLM- (Product Lifecycle Management)-Systeme integriert sind.

Die große Variabilität bestehender digitaler Menschmodelle betrifft die Benennung von Segmenten oder Gelenken, die Definition globaler und lokaler Koordinatensysteme und Freiheitsgrade (DoF) der Gelenk- und Segmentbewegung sowie die eingebetteten anthropometrischen und biomechanischen Daten (Paul & Wischniewski, 2012), detaillierte Ausführungen dazu finden sich im Abschnitt „Schnittstellen/ Aspekte des Datenaustauschs“.

Anthropometrie

Die anthropometrische Datenbasis eines digitalen Menschmodells beruht meist auf Reihenuntersuchungen, bei denen Körpermaße von Individuen einer bestimmten Population gemessen und statistisch ausgewertet werden. In Deutschland existiert als anthropometrische Datenbasis die DIN 33402-2:2020-12 (DIN 33402-2), die auf Basis der Definitionen verschiedener Körpermaße aus DIN 33402-1:2008-03 (DIN 33402-1) und DIN EN ISO 7250-1:2017-12 (DIN EN ISO 7250-1) perzentilierte, altersabhängige anthropometrische Maße der deutschen Bevölkerung enthält (Mühlstedt, 2016b). Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) hat im Jahr 2022 einen aktualisierten anthropometrischen Datensatz der deutschen Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter veröffentlicht (Bonin, Ackermann, Radke, Peters & Wischniewski, 2022). Eine weitere wichtige Quelle für anthropometrische Daten ist die Veröffentlichung der BAuA, die den sogenannten Europamensch definiert (Jürgens, Matzdorff & Windberg, 1998). In dieser Richtlinie sind anthropometrische Datenbasen verschiedener europäischer Länder zusammengefasst. Weitere Normen und Veröffentlichungen zu anthropometrischen Daten sind bei Mühlstedt (2016b) aufgeführt, darunter die DIN EN ISO 11064-3:2000-09 zu anthropometrischen Daten der Weltbevölkerung sowie DIN 33408-1:2008-03, DIN EN ISO 14738:2009-07, DIN EN 547-3:2009-01, DIN 5566-1:2020-05, in denen anthropometrische Einzelmaße angegeben sind.

Die in der Anthropometrie verwendeten verschiedenen Größen bzw. Variablen können in Geschlecht und Perzentil, Körpermaße (Roh- und aggregierte Daten), sowie soziodemografische Daten zu Population und Stichprobe gegliedert werden.

In den letzten Jahren wurden groß angelegte Reihenuntersuchungen zur Erfassung anthropometrischer Daten durchgeführt. Ein Beispiel ist das Programm SizeGermany mit der Messung von mehr als 12.000 Personen. Die Auswahl der Probanden erfolgt möglichst so, dass eine repräsentative Abbildung der Variabilität der Körpermaße in der untersuchten Population gegeben ist und die Daten statistisch belastbar sind (gegebenenfalls ist statistische Belastbarkeit nicht gegeben für bestimmte soziale Hintergründe oder ethnische Herkünfte). Die gleiche Methode wird für das Programm SizeItaly, SizeSpain, SizeUK und derzeit für SizeAmerica angewendet, das die Vereinigten Staaten und Kanada umfasst (Bubb, 2019).

In Normen sind Daten von 130 Körpermaßen zu finden. Von diesen 130 Körpermaßen sind 56 in der übergeordneten Basisnorm DIN EN ISO 7250-1:2017-12 enthalten. Der Rest ist auf eine Vielzahl anderer Normen verteilt.

Heutzutage verfügen die meisten DHM-Programme über anthropometrische Bibliotheken mit Körpermaßen (aus manuellen oder 3D-gescannten Messungen), die eine statistische Aufschlüsselung und Gruppierung der Populationen (z. B. 5. Perzentil der US-Männer) ermöglichen. Die meisten DHM-Softwareprogramme verwenden die Erhebungen ANSUR (Gordon et al., 2012a, 1989) und Civilian and European Surface Anthropometry Resource Project - CAESAR. Diese Datenbanken ermöglichen es den Entwicklern, CAD-Modelle und Dummies nach anthropometrischen Maßen zu erstellen und zu skalieren, die verschiedene Bevölkerungsgruppen repräsentieren (Demirel et al., 2022). Die Detailliertheit, Aussagekraft und Qualität der (arbeitswissenschaftlichen) Analysen, die mit DHM durchgeführt werden, ist von der Detailliertheit, Repräsentativität und Qualität der eingespeisten anthropometrischen Daten abhängig.

Demirel et al. (2022) geben einen Überblick zu anthropometrischen Datenbanken (Abbildung 5).

		Subjects					
Database Code	Database Name	Released	Survey Year	Male	Female	Age	References
North America							
AnthroKids	Anthropometric Data of Children	1977	1975–1977	1,972	1,918	2–19	AnthroKids (2020)
NHANES - I	National Health and Nutrition Examination Survey – 1981	1981	1971–1974	11,779	16,264	1–74	NCHS (1981)
FAA-AM-83-1 6	Anthropometric And Mass Distribution Characteristics Of The Adult Female	1983	1983	0	46	21–45	Young et al. (1983)
NHANES - II	National Health and Nutrition Examination Survey – 1984	1984	1976–1980	13,406	14,395	1–75	NCHS (1984)
ANSUR-I	Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel – 1988	1988	1987–1988	1,774	2,208	17–51	Gordon et al. (1989)
NBDL-87R003	Anthropometry and Mass Distribution for Human Analogues	1988	1981–1988	139	0	–	U.S. Army Air Force and Navy (1988)
NASA RP-1304	Anthropometric Survey of the Astronaut Applicants and Astronauts	1993	1985–1991	399	74	26–63	Rajulu and Klute (1993)
NHANES - III	National Health and Nutrition Examination Survey – 1994	1994	1988–1994	19,166	20,529	1–80+	NCHS (1988)
UMTRI-99-16	Seated Anthropometry During Pregnancy	1999	–	0	22	–	Klinich et al. (1999)
CEASAR	Civilian American And European Surface Anthropometry Resource	2000	1998–2000	1,120	–	18–65	Boehmer et al. (2002)
SizeUSA	National Sizing Survey of the U.S.	2003	2002–2003	10,500	–	18–65	Bougourd and Treleven (2020)
Mexican Jalisco	Dimensiones Antropométricas de la Población Latinoamericana: Jalisco, México	2007	2007	351	229	17–39	Chaurand et al. (2007)
ANSUR-II	Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel – 2012	2012	2010–2012	4,082	1,986	–	Gordon et al. (2012a)
NATICK/TR-16/013	Anthropometric Survey Of U.S. Army Pilot Personnel	2012	2011–2012	976	42	17–58	Gordon et al. (2012b)
DRDC-RDDC-2015-R186	Canadian Forces Anthropometric Survey (CFAS)	2012	2012	1,890	315	18–60	Keefe et al. (2015)
NIOSH RD-1007-2015-0	Firefighter Body Dimensions	2015	–	863	88	–	National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH] (2015)
DHHS PN 2015-116	Anthropometric Study of U.S. Truck Drivers	2015	2009–2010	1,779	171	20–65	Guan et al. (2015)
NIOSH RD-1008-2016-0	Anthropometric Database for the EMTs in the United States	2016	2013–2015	472	161	–	NIOSH (2016)
SizeNorthAmerica	North American Sizing Survey	2018	2016–2018	18,000	–	6–75	Seidl et al. (2016)
NHANES - 2018	National Health and Nutrition Examination Survey – 2020	2020	2017–2018	8,233	7,978	1–80+	NCHS (2020)
Europe							
CEASAR	Civilian American And European Surface Anthropometry Resource	2000	1998–2000	974	1,077	18–65	Boehmer et al. (2002)
SizeUK	National Sizing Survey of the U.K.	2002	2001–2002	5,500	–	16–95	Bougourd and Treleven (2010)
Turkish	Estimated anthropometric measurements of Turkish adults	2007	2007	2,263	1,942	20–85	Ali and Arslan (2009)
SizeGERMANY	German Sizing Survey	2008	2007–2008	4,922	7,210	6–87	Avlution (2020)
Spanish	Ministry of Health Spanish Sizing Survey	2008	2007–2008	0	10,141	12–70	Alemamy et al. (2010)
SizeItaly	Italian Sizing Survey	2013	2012–2013	3,336	2,537	18–75	Stampfli et al. (2012)
Swedish	Swedish anthropometric study	2006	2009	105	262	18–65	Hanson, Sperling et al. (2009)
Asia							
GB/T 10000-1988	Human dimensions of Chinese Adults – 1988	1988	1985–1988	11,164	11,150	18–60	Cao et al. (2016)
Indian	Indian Anthropometric Dimensions for Ergonomic Design Practice	1997	2000–2002	710	251	–	Roebuck (1999)
Japanese 1991–1992	AIST Human Body Size Database	2005	1991–1992	250	250	18–88	AIST/HQL (2020)
Japanese 2003	AIST/HQL Human Body Dimension/Shape Database	2009	2003	49	48	20–35	AIST (2020)
South Korean	Size Korea – 7th Korean Human Dimension Survey Project	2015	2010	7,050	7,150	1–90	Kim et al. (2017)
Malaysian	Anthropometric Measurements Among Four Asian Countries	2018	–	146	168	18–45	Abd Rahman et al. (2018)
Chinese	Human dimensions of Chinese Adults – 2018	2018	2013–2018	26,000	–	18–75	Zhao et al. (2019)

Abbildung 5 Anthropometrische Bevölkerungsdatenbanken (aus Demirel et al. (2022))

Bewegungserfassung (Motion Capture Systems)

Zhu, Fan und Zhang (2019) unterscheiden fünf Typen der Bewegungskontrolle von DHM:

- key frame methods: manuelle Anpassung jeder Schlüsselhaltung eines DHM und Interpolation von Schlüsselhaltungen, um kontinuierliche Bewegungen zu erzeugen,
- motion capture methods: Antrieb von DHMs anhand von Bewegungsdaten, die von echten Menschen erfasst wurden,
- model-driven methods: Konstruktion von Bewegungsfunktionen für menschliche Bewegungen und Erzeugung kontinuierlicher Bewegungen, indem verschiedene Parameter in die Bewegungsfunktionen eingegeben werden,
- motion synthesis methods: Bearbeitung und Synthese gespeicherter Bewegungsdaten, um die gewünschten Bewegungen für DHMs zu erzeugen,
- motion planning methods: Verwendung von Zufallsstichproben, die zur Lösung des Problems der Bewegungserzeugung für DHMs in komplexen Umgebungen und Aufgaben verwendet werden und hauptsächlich im Bereich der Robotik eingesetzt werden.

Key-Frame- und Motion-Capture-Methoden sind die wichtigsten Bewegungskontrollmethoden, die in der Fertigungsindustrie eingesetzt werden.

Für Motion Capture Methods werden Bewegungsdaten eines Menschen zur Übertragung auf ein digitales Menschenmodell benötigt; Motion Capture (MoCap) beinhaltet die Aufzeichnung von solchen Daten. MoCap Systeme können optisch (kamerabasiert) oder nicht optisch (sensor-basiert) sein. Die optischen Systeme arbeiten entweder mit oder ohne Marker.

Optische Systeme:

- Markerbasiert: Beim optischen Tracking mit Markern wird mit Kameras gearbeitet, welche aktive (also ein Signal emittierende) oder passive Marker (reflektierend) an den zu erfassenden Personen oder Gegenständen verfolgen. Anhand der Markerbewegungen in den einzelnen Kamerabildern kann mittels Triangulation die Position der Marker in 3D berechnet werden.
- Nicht markerbasiert: Verschiedene Kameras erfassen markerlose Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln und synchronisiert diese.

Nicht optische Systeme:

- Inertial: Inertialsysteme verwenden Inertialmesseinheiten (IMUs). Zur Erfassung der sechs möglichen kinematischen Freiheitsgrade verfügt eine IMU über drei jeweils aufeinander orthogonal stehende Beschleunigungssensoren (Translationssensoren) für die Erfassung der translatorischen Bewegung in x- bzw. y- bzw. z-Achse und drei orthogonal zueinander angebrachte Drehratensensoren (gyroskopische Sensoren) für die Erfassung rotierender (kreisender) Bewegungen in x- bzw. y- bzw. z-Achse.
- Mechanisch: Mechanische Systeme verwenden Exoskelette und Sensoren, die an den Gelenken befestigt sind, um menschliche Bewegungen zu erfassen.
- Magnetisch: Magnetische Systeme nutzen die Änderung der Spannung oder des Stroms, um durch den relativen magnetischen Fluss die Position und die Orientierung von am menschlichen Körper angebrachten Sendern zu messen.

Tabelle 2 listet die bei der Recherche in den Studien identifizierten MoCap Systeme auf, die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern führt Systeme auf, die in bei dieser Recherche identifizierten Studien beschrieben/eingesetzt wurden.

Tabelle 2 Gängige MoCap Systeme

Name	Entwickler/ Anbieter	Land	Webseite
ART Motion Capture-System	Advanced Realtime Tracking GmbH & Co. KG (ART)	DE	https://ar-tracking.com/de/solutions/ergonomics
CodaMotion	CodaMotion Ltd.	UK	https://codamotion.com/
GTeleMyo 2400 DTS System	Noraxon	US	https://www.noraxon.com/
Leap Motion Controller	ultraleap	US	https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/
Microsoft Kinect	Microsoft	US	https://azure.microsoft.com/de-de/products/kinect-dk/#faq
Motion Analysis Corporation	Santa Rosa	US	https://motionanalysis.com/
Octolus Rift/ Meta Quest	Meta	US	https://motionanalysis.com/
OptiTrack	NaturalPoint, Inc	UA	https://optitrack.com/
Perception Neuron	Noitom Ltd.	UA	https://neuronmocap.com/pages/perception-neuron-studio-system
Polaris Vega	NDI Europe GmbH	DE / CN	https://www.ndieurope.com/de/produkte/optische-mess-systeme/
Polaris Vicra	NDI Europe GmbH	DE / CN	https://www.ndieurope.com/de/produkte/optische-mess-systeme/
Qualisys	Qualisys AB	SE	https://www.qualisys.com/
SIMI	Simi Reality Motion Systems GmbH	DE	http://www.simi.com/de/home.html
Smart DX	BTS Bioengineering	IT	https://www.btsbioengineering.com/products/smart-dx-motion-capture/?gclid=EAlaQob-ChMli9q_zJaA-wIVRePmCh21kA-EYEAAYASAAEgLNvVD_BwE
Vicon Nexus	Vicon Motion Systems Ltd	UK	https://www.vicon.com/software/nexus/
Virtools	Dassault Systèmes	FR	https://www.3ds.com/products-services/3dvia/
Xsens MTw Awinda	Xsens Technologies B.V.	NL	https://www.xsens.com/products/mtw-awinda
Xsens MVN Animate	Xsens Technologies B.V.	NL	https://www.xsens.com/products/mvn-animate

Mit MoCap Systemen erfasste Bewegungsdaten sind in umfangreichen Datenbanken gespeichert, die von kommerziellen und Forschungsinstituten (siehe Tabelle 3). angeboten werden. Diese Datenbanken enthalten viele verschiedene Arten von Aktionen und jede Aktion kann viele Varianten haben. Die Aggregation und Integration vorhandener Daten in ein einheitliches und strukturiertes Datenbanksystem ist nicht einfach und es existiert aktuell keine einheitliche Lösung für die Sammlung von Bewegungserfassungsdaten aus verschiedenen Quellen in einer Datenbank. Die direkte Verwendung von Bewegungsdaten in DHM-Tools erfordert jedoch eine ordnungsgemäße Indizierung der Bewegungen für die automatische Auswahl und den Abruf; DHM-Tools sind somit nicht in der Lage, diese Daten effizient zu nutzen (Keyvani, Lämkuil, Bolmsjö & Örtengren, 2013). Tabelle 3 listet einige MoCap Datenbanken auf, um die Vielfalt der Inhalte und Strukturen von MoCap Datenbanken zu verdeutlichen. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern führt Datenbanken auf, die in bei dieser Recherche identifizierten Studien beschrieben/eingesetzt wurden.

Tabelle 3 MoCap Datenbanken

Name	Entwickler/ Anbieter	Land	Webseite	Inhalt
CMU Graphics Lab Motion Capture Database	Carnegie Mellon University (CMU)	US	http://mocap.cs.cmu.edu/	Bewegungsdaten (C3D, ASF/AMC, VSK/V, TXT), aufgezeichnet mit Vicon Kameras im Motion Capture Lab der CMU
Cologne Motion Capture Database	TH Köln	DE	https://mocap.web.th-koeln.de/	Bewegungsdaten (BVH und C3D), aufgezeichnet am Motion Capturing Center an der Fachhochschule Köln
Emotional Body Motion Database	Universität Tübingen	DE	http://ebmdb.tuebingen.mpg.de/index.php	Bewegungsdaten (BVH, MVNX), 1447 Datensätze
AMASS (Archive of Motion Capture As Surface Shapes)	Max-Planck-Gesellschaft	DE	https://amass.is.tue.mpg.de/index.html	40 Stunden Bewegungsdaten von über 300 Personen, mehr als 11000 Bewegungen
HDM05	Universität Bonn, Hochschule der Medien, Max-Planck-Institut Informatik, Universität des Saarlandes	DE	https://resources.mpi-inf.mpg.de/HDM05/index.html	Bewegungsdaten (C3D, ASF/AMC), aufgezeichnet 2005 an der HDM (70 Bewegungsklassen in 10 bis 50 Realisierungen)
Human Motion Dynamics on Actuation Level (HuMoD)	Technische Universität Darmstadt	DE	https://www.sim.informatik.tu-darmstadt.de/res/ds/humod	Bewegungsdaten von 2 Subjekten (M/W), jeweils 8 Bewegungsabläufe, Rohdaten (MAT) und Auswertungen (PNG)
HumanEva-I	Max-Planck-Institute for Intelligent Systems Perceiving Systems	DE	http://humaneva.is.tue.mpg.de/#:~:text=The%20HumanEva%2DI%20dataset%20contains,%2C%20gesturing%2C%20etc.	7 kalibrierte Videosequenzen (4 Graustufen- und 3 Farbsequenzen), die mit 3D-Körperposen aus einem Motion-Capture-System synchronisiert sind
Interaction Database	University of Edinburgh	GB	https://www.i-pab.inf.ed.ac.uk/cgvu/InteractionDatabase/interactiondb.html	Objekt- und Bewegungsdaten, zur Erstellung von Interaktionen
Interactive Emotional Dyadic Motion Capture (IE-MOCAP) Database	University of Southern California	US	https://sail.usc.edu/iemocap/	12 Stunden audiovisuelle Daten, einschließlich Video, Sprache, Bewegungserfassung des Gesichts, Texttranskriptionen, aufgezeichnet an der USC
KIT Whole-Body Human Motion Database	Karlsruhe Institute of Technology (KIT)	DE	https://motion-database.humanoids.kit.edu/	2925 Bewegungsexperimente, 229 Subjekte (M/W), 158 Objekte, C3D, 7180 Datensätze
Mocap Club	Motion Capture (Mocap) Club	-	http://mocapclub.com/	Über 500 Bewegungsabläufe (C3D, TRC)
SFU Motion Capture Database	Simon Fraser University, National University of Singapore	CA, SG	https://mocap.cs.sfu.ca/	8 Subjekte (M/W), Bewegungsabläufe (Fortbewegung, Tanz, Kampfsport, Sport), Interaktionen mit Objekten

Umgebungen (Environments)

Digitale Menschmodelle sind als eigenständige Softwaresysteme oder Teile von Softwaresystemen (z.B. CAD-Systeme) entwickelt worden. Mit ihrer Einbettung in (Arbeits-)Umwelten und Manipulation von Körperhaltungen und Funktionen (siehe auch Abbildung 1) können Erkenntnisse in den Domänen Arbeitswissenschaft, Kognition, Medizin und weiteren erarbeitet werden. Die (Arbeits-)Umwelten werden klassisch mit CAD-Programmen erstellt.

DHM können auch in Verbindung mit Virtual-Reality-Technologien eingesetzt werden, um die Nutzungserfahrung von Produkten durch visuell unterstützte, immersive Interaktion zu verändern und den Grad der Interaktion und des Realismus zu erhöhen. Virtual Reality (VR)-Technologien im DHM-Bereich konzentrieren sich auf die reale oder metaphorische Simulation von Produkten oder Systemen. Sie werden häufig verwendet, um zu demonstrieren, wie das Design auf einem großen Bildschirm oder einem Headset aussehen würde, damit die Benutzer die Produktvarianten oder Szenarien „durchlaufen“ können (Demirel et al., 2022). VR wird in immersive VR und nicht-immersive VR unterteilt. Immersive VR stellt hauptsächlich virtuelle Umgebungen mit Hilfe von automatischen virtuellen Höhlenumgebungen (CAVE) oder kopfgetragenen Displays (HMD) dar, die den Nutzern ein starkes und immersives Gefühl der Präsenz vermitteln können. Allerdings ist die Anwendung von CAVE- und HMD-Systemen relativ selten. Im Gegensatz dazu werden bei der nicht-immersiven VR virtuelle Umgebungen mit Hilfe von Desktop-Displaysystemen dargestellt, die kein hohes Maß an Immersion bieten können (Zhu et al., 2019).

Von Geiger, Brandenburg und Stark (2020) wurde die NASA TLX Methode zur Analyse der Gesamtarbeitsbelastung in ein VATS (virtual action tracking system) implementiert, um die subjektive Arbeitsbelastung zu messen und eine Montagereihenfolge für ein digitales Menschmodell abzuleiten. Das VATS soll auch für DHM wie Jack, Human Builder, Ramsis und EMA verwendet werden können. Weitere Beispiele finden sich bei Da Silva, Gomes und Winkler (2022) und Zhong, Weistroffer, Maurice, Andriot und Colas (2022).

Auch bei der erweiterten Realität (Augmented Reality, AR) werden Projektionstechnologien eingesetzt, um das computergenerierte Bild mit der realen Welt zu verschmelzen (z. B. wird das interaktive 3D-Bild über das normale Sichtfeld gelegt oder überlagert). So werden die virtuelle Welt und die reale Welt miteinander verbunden, ohne dass teure physische Prototypen gebaut werden müssen.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden verschiedene Geräte entwickelt, die die menschlichen Sinne (z. B. Sehen, Tasten und Riechen) simulieren, mit unterschiedlichen Leistungen und zu geringen Kosten: am Kopf montierte Displays, Handtracking-Geräte, haptische Geräte und Geruchssysteme.

Obwohl die virtuelle Realität von vielen Forschern und Entwicklern als wichtigster aktueller Trend im Bereich der digitalen Menschmodellierung angesehen wird, haben Da Silva et al. (2022) in ihrem Review nur einige wenige Fälle identifiziert, in denen virtuelle Realität und digitale Menschmodelle für ergonomische Analysen während der frühen Produktentwicklung eingesetzt wurden. Sie stellten fest, dass diese Analyse auf vorgefertigte Produktionsprozesse ausgerichtet war, bei denen alle Ressourcen (Geräte, Einrichtungen, Anlagen usw.) vollständig installiert waren.

Arbeitswissenschaftliche Verfahren

Arbeitswissenschaftliche Analysen lassen sich nach verschiedenen Fragestellungen kategorisieren:

- 3D-Visualisierung von anthropometrischen Problemstellen und Kollisionen
- Sichtanalyse (Analyse von Blick- und Gesichtsfeld, Ermittlung verdeckter Objekte)
- Erreichbarkeitsanalyse (Untersuchung des Erlangens z. B. von Bedienhebeln)
- Maßanalyse (Erfassung von Abständen bzw. Bewegungsräumen)
- Haltungs- und Kraftanalyse (Bewertung von Körperhaltungen und verschiedenen Belastungen)
- Lastenhandhabungsanalyse
- Ganganalyse
- Energieverbrauchs-/Stoffwechselanalyse
- Ermüdungsanalyse
- Zeitanalyse
- u.a.

Dabei sind je nach Zielstellung der Entwicklung einzelne oder mehrere der Verfahren in unterschiedlichsten Konstellationen in das DHM integriert. Die Ergonomie-Verfahren, die in der digitalen Ergonomie Anwendung finden, basieren meist auf existierenden Tabellen, Arbeitsblättern oder Schablonen (Mühlstedt, 2016c).

Tabelle 4 gibt einen Überblick zu ergonomischen Standardverfahren (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Aktuell sind bevorzugt in der Arbeitswissenschaft eingesetzte Verfahren z. B. RULA, EAWS, OWAS, NIOSH, Diskomfort oder MTM digital umgesetzt.

Tabelle 4 Übersicht zu ergonomischen Standardverfahren

Verfahren kurz	Verfahren lang	Quelle	Art	Inhalt	Endpunkt
NIOSH	Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung: Manuelle Handhabung von Gegenständen	DIN EN 1005-2:2009-05	Lastenhandhabungsanalyse	Abschätzung der Maximallast bei Lastenhandhabungen	RWL als empfohlene Massegrenze RML, Risikoindex RI als Verhältnis von tatsächlicher Masse zu Massegrenze
-	Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung: Empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung	DIN EN 1005-3:2009-01	Kraftanalyse	Leitfaden zur Kontrolle solcher gesundheitlicher Risiken, die auf Handhabungskräfte im Umgang mit Maschinen zurückzuführen sind	-
Energieumsatz	-	-	Stoffwechselanalyse	Bewertung des Energieverbrauchs komplexer Tätigkeiten anhand von Referenzwerten	Energieumsatzwerte in Kilojoule
Diskomfort	Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung: Körperhaltungen und Bewegungen	DIN EN 1005-4:2009-01	Haltungsanalyse	Nutzung der Gelenkwinkel des Menschen zur Bewertung des Diskomforts	Punktbewertung (1: akzeptabel, 2: bedingt akzeptabel, 3/4: nicht akzeptabel)
-	Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung: Kurzzyklische Tätigkeiten mit hohen Handhabungsfrequenzen	DIN EN 1005-5:2007-05	Belastungsanalyse	Grobprüfung, ob die Merkmale einer kurzzyklischen Tätigkeit vorliegen	Mehrere Fragen (Ja/Nein)

-	Sichtfeld von Erd- baumaschinen	ISO 5006:2017- 04	Sichtanalyse	Ermittlung der Ver- schattungen bezie- hungsweise Verde- ckungen, welche durch die Bauteile der Maschine (zum Beispiel Kabinen- pfosten, Auspuff) ent- stehen (1-12 m Um- kreis)	Bestimmung der An- nehmbarkeit des Sichtfelds
EAWS	Ergonomic Assembly - Worksheet	-	Kombination Hal- tungs-, Kraft-, Las- tenhandhabungs- analyse	ergonomische Be- wertung von stati- schen Haltungen (Sektion 1), Aktions- kräften (Sektion 2), Lastenhandhabun- gen (Sektion 3) sowie repetitiven Tätigkei- ten (Sektion 4)	Punktbewertung kombiniert mit einer Ampel-Einstufung
H-Punkt und SAE-Schab- lone		DIN 70020- 1:2006-07	Haltungsanalyse	Bestimmung der Po- sition des Punktes in der Mittelebene des Fahrzeuginsassen, durch den die theore- tische Drehachse zwischen dem Bein und dem Rumpf ver- läuft	Abbildung der Geo- metrien von Schab- lone bzw. Messma- schine
MTM-Verfah- ren	Methods Time Mea- surement	-	Zeitanalyse	Analyse von Abläu- fen menschlicher Handlungen und prospektiv Hinterle- gung mit Zeiten	aggregierte Zeit- werte für Arbeitsab- läufe
OWAS	OVAKO-Working- Posture-Analysing- System	-	Haltungsanalyse	Beurteilung von Ar- beitssituationen an- hand der Körperhal- tung und Einstufung in Maßnahmenklas- sen	(farbig hinterlegte) Einstufung in die Maßnahmenklassen
RULA	Rapid Upper Limb Assessment	-	Haltungsanalyse	Bewertung der obern Extremitäten an Arbeitsplätzen	Gesamt-Score zwis- chen 1 (akzeptabel) und 7 (Maßnahmen zwingend erforder- lich)
REBA	Rapid Entire Body Assessment	-	Haltungsanalyse	Untersuchung so- wohl der oberen als auch der unteren Teile des Bewe- gungsapparats auf biomechanische und MSD-Risiken	Score 1-12
Siemens/ Bu- randt/ REFA- FA Chemie	-	-	Kraftanalyse	Berechnung von Kraftgrenzen bzw. Bedienkräften und -momenten	berechnete Grenz- last
Snook & Ciri- ello	-	-	Lastenhandha- bungsanalyse	maximal akzeptierte Lasten zum Heben, Absetzen, Tragen, Schieben und Ziehen (Tabellen)	Maximalwerte für Lastenhandhabun- gen
SSP	Static Strength Pre- diction Model	-	Lastenhandha- bungsanalyse	Werte für Lasten- handhabungen (He- ben) und mögliche Kräfte (Drücken, Zie- hen)	Kraftaufwendung
-	Sichtanforderungen für optische Anzeige- einrichtungen	-	Sichtanalyse	ergonomische Anfor- derungskriterien für Elemente zur	-

				Informationsverarbeitung, die den optischen Sinneskanal ansprechen	
-	Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen	DIN EN ISO 14738:2009-07	Maßanalyse, Hal- tungsanalyse	Gestaltung von Arbeitsplätzen für Industrie und Dienstleistungsbereich auf Basis anthropometrischer Maße	Arbeitshöhe, Sitzhöhe etc., Körperhaltungen
DIN 33411-4	Körperkräfte des Menschen - Teil 4: Maximale statische Aktionskräfte (Isodyn- nen)	DIN 33411-4:1987-05	Kraftanalyse	maximale statische Aktionskräfte männlicher Arbeitspersonen in Form von Kurven gleicher Kraft	-
DIN 33411-5	Körperkräfte des Menschen - Teil 5: Maximale statische Aktionskräfte, Werte	DIN 33411-5:1999-11	Kraftanalyse	maximale statische Aktionskräfte für 19 verschiedene Körperstellungen	-
DIN 33411-3	Körperkräfte des Menschen - Teil 3: Maximal erreichbare statische Aktionsmomente männlicher Arbeitspersonen an Handrädern	DIN 33411-3:186-12	Kraftanalyse	maximale statische Aktionskräfte männlicher Arbeitspersonen an Handrädern	-
	Manuelle Lastenhandhabung - Teil 1: Heben und Tragen	ISO 11228-1:2021-10	Lastenhandhabungsanalyse	empfohlene Lastgrenzen für das Heben und Tragen unter spezieller Berücksichtigung der Intensität, der Frequenz und der Dauer der Tätigkeit	-
	Manuelle Lastenhandhabung - Teil 2: Schieben und Ziehen	ISO 11228-2:2007-04	Lastenhandhabungsanalyse	Ableitung von empfohlenen Lastgrenzen für das Schieben und Ziehen von Gegenständen, wenn zur Ausführung „der gesamte Körper“ eingesetzt wird	-
	Manuelle Lastenhandhabung - Teil 3: Häufiges Handhaben eher leichter Lasten	ISO 11228-3:2007-04	Lastenhandhabungsanalyse	ergonomische Empfehlungen für repetitive Tätigkeiten, die das manuelle Handhaben von vergleichsweise geringen Lasten bei hoher Handhabungsfrequenz beinhalten	-
	Ergonomie – Körperhaltungen	ISO 11226:2000-12	Haltungsanalyse	ergonomische Empfehlungen für unterschiedlichste Tätigkeiten, die von „statischen“ Arbeitshaltungen ohne oder mit allenfalls minimaler externer Kraftausübung geprägt sind	-
	Manuelles Bewegen von Personen in der Pflege	ISO/TR 12296:2012-06	Kombination Haltungs-, Kraft-, Lastenhandhabungsanalyse	Beurteilung der mit dem manuellen Bewegen von Patienten im Bereich des Gesundheitswesens verbundenen Probleme und Gefährdungen	-

	Gestaltung von Arbeitssystemen	DIN EN ISO 6385:2016-12	Haltungsanalyse	Rahmenwerk zur Gestaltung von Arbeitssystemen	
MKA	Montagespezifischer Kraftatlas	IFA	Kraftanalyse	Bewertung ein- und beidhändiger symmetrischer und asymmetrischer homogener Kraftausübungen des Arm-Schulter-Ganzkörpersystems in den Körperhaltungen „Sitzen“, „Stehen“, „Knien“ jeweils „Über Kopf“, „Aufrecht“ und „Gebeugt“ sowie in sechs verschiedenen Krafrichtungen (insgesamt 324 Kraftfälle)	Gesundheitsrisikowert berechnet aus Körperhaltung und Aktionskräften
LMM-HHT	Leitmerkalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen beim manuellen Heben, Halten und Tragen von Lasten ≥ 3 kg	BAuA	Lastenhandhabungsanalyse	Beurteilung und Gestaltung von Belastungen beim manuellen Heben, Halten und Tragen von Lasten ≥ 3 kg	Punktwert 1- >100, Ampelskala
LMM-ZS	Leitmerkalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen beim manuellen Ziehen und Schieben von Lasten	BAuA	Lastenhandhabungsanalyse	Beurteilung und Gestaltung von Belastungen beim manuellen Ziehen und Schieben von Lasten	Punktwert 1- >100, Ampelskala
LMM-MA	Leitmerkalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen	BAuA	Kraftanalyse, Haltungsanalyse	Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen	Punktwert 1- >100, Ampelskala
LMM-GK	Leitmerkalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei der Ausübung von Ganzkörperkräften	BAuA	Kraftanalyse	Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei der Ausübung von Ganzkörperkräften	Punktwert 1- >100, Ampelskala
LMM-KH	Leitmerkalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen durch Körperzwangshaltungen	BAuA	Kraftanalyse, Haltungsanalyse	Beurteilung und Gestaltung von Belastungen durch Körperzwangshaltungen	Punktwert 1- >100, Ampelskala
LMM-KB	Leitmerkalmethode zur Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei Körperfortbewegung	BAuA	Kraftanalyse, Haltungsanalyse	Beurteilung und Gestaltung von Belastungen bei Körperfortbewegung	Punktwert 1- >100, Ampelskala
CUELA	Computer-Unterstützte Erfassung und Langzeit-Analyse von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems	IFA	Belastungsanalyse	Gefährdungsbeurteilung bei physischer Belastung	Messung Kräfte, Winkel

Dateiformate

Bonin et al. (2014) unterscheiden grundsätzlich zwischen drei Dateiformaten:

- Dateiformate für geometrische Informationen (statische 3D-Festkörper, anthropometrische Daten),
- Dateiformate für kinematischen und kinetischen Daten (hierarchische Skelettstrukturen oder Marker-Bewegungen),
- Dateiformate umfassender Daten wie Geometrie, Dynamik und Struktur.

Es existieren verschiedene Quasi-Standards (Formate, die für den Datenaustausch gängig sind, ohne dass sie offiziell als Standard anerkannt wurden) wie z.B. ASF/AMC (Schafer, 1994), BVH (Meredith & Maddock, 2001), GMS (Luciani et al., 2010), C3D (Motion Lab Systems, 2008), COLLADA (Khronos Group, 2008) oder X3D (ISO/IEC 19777-1; ISO/IEC 19777-2; ISO/IEC CD 19777-3; ISO/IEC 19775-1; ISO/IEC 19775-2; ISO/IEC 19776-1; ISO/IEC 19776-2; ISO/IEC 19776-3), die zum Teil von der Spiele- und Filmindustrie in Verbindung mit Motion Capturing vorangetrieben werden. Einige werden im Folgenden beschrieben.

Dateiformate für Daten von 3D-Objekten (Volumenkörpern)

Bei DHM-Systemen werden statische 3D-Daten verwendet, um die Arbeitsplatzgestaltung, Werkzeuge, Maschinen und die Umgebung aus externer Software, z. B. aus Computer-Aided Design (CAD)-Systemen, zu integrieren. Für den Austausch von statischen 3D-Daten innerhalb von DHM-Systemen ist es sinnvoll, ein herstellerneutrales, gut dokumentiertes, standardisiertes Format zu haben. Für eine Echtzeitsimulation ist es vorteilhaft, ein kleines Dateiformat zu wählen und nicht ein sehr detailliertes (Bonin et al., 2014).

IGES (Initial Graphics Exchange Specification)

IGES ist ein herstellerneutrales Dateiformat für den Datenaustausch zwischen CAD-Systemen, das als Norm beim American National Standards Institute (ANSI) ANS Y14.26M-1981 registriert ist. IGES ist nach wie vor ein beliebtes neutrales Format (Nasr & Kamrani, 2006), aber seine letzte offizielle Version 5.3 wurde 1996 veröffentlicht. Es scheint, dass die Entwicklung seit dem Aufkommen der neuen ISO-Norm STEP (ISO 10303) eingestellt wurde. Die große Dateigröße und die damit verbundene Bearbeitungszeit könnten für die Verwendung im DHM unpraktisch und einschränkend sein.

OBJ (Object)

OBJ ist ein offenes Dateiformat zum Speichern von dreidimensionalen geometrischen Formen. Objektdateien definieren die Geometrie und andere Eigenschaften für Objekte im Advanced Visualizer von Wavefront. Objektdateien können auch verwendet werden, um Geometriedaten zwischen dem Advanced Visualizer und anderen Anwendungen hin und her zu übertragen. Das Format wird von vielen 3D-Grafikprogrammen unterstützt und ist daher geeignet für die programm- und plattformübergreifende Weitergabe von 3D-Modellen (*Object Files (.obj)*, 2019).

JT (Jupiter)

JT ist ein 3D-Modellformat, das als offenes, hochleistungsfähiges, kompaktes und beständiges Speicherformat für sehr große Zusammenstellungen von Produktdaten entwickelt wurde (ursprünglich von EAI, dann UGS, jetzt Siemens PLM Software). Es ist jetzt standardisiert unter ISO 14306:2017-11 (Abbildung 6). JT ist ein überzeugendes Dateiformat für die DHM-Zusammenarbeit, da es eine geringe Dateigröße (je nach gewählter Geometrie und Detaillierungsgrad) aufweist, aber die Möglichkeit bietet, den Detaillierungsgrad bis hin zur exakten Randdarstellung mit Flächen (NURBS), Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) und Metadaten zu erweitern (Bonin et al., 2014).

Data model	
Product structure	Assembly, part, instance
Facet	Polygon, polygon set
Lighting	Light set, point light, infinite light
Textures, materials	
Precise geometry and product topology	Exact boundary representation surfaces (NURBS)
Boundary representations	JT B-rep and XT B-rep (Parasolid) format, STEP B-rep
Geometry primitives	Box, cylinder, pyramid, sphere
Manufacturing data	Product manufacturing information, dimensions, tolerances, etc.
Metadata	Attributes, properties, text, date, layers
File format	
Per part	All assembly nodes in a product structure hierarchy are stored in a single JT file, and each part node in the hierarchy is stored in an individual JT file in a subdirectory that is of the same name as the assembly JT file
Fully shattered	Each product structure node in the hierarchy is stored in an individual JT file
Monolithic	All product structure is stored in a single JT file
PLMXML	Open XML-based file format. PLMXML structure may link to the model data in another file (external representation), or the data can be embedded within the XML file (internal representation)
STEP AP 242 XML	ISO Standard, which allows to represent assembly, meta, kinematic data, etc., and to link to the model data as external references (leaves on an STEP tree)

Abbildung 6 JT Datenmodell und Dateiformat nach Peters, Wischniewski und Paul (2019) und ISO 14306 (ISO 14306)

STEP (Standard for the Exchange of Product model data)

STEP ist eine internationale Norm (ISO 10303-1:2021-03; ISO 10303-21:2016-03) für den Austausch von 3D-Daten. STEP verwendet eine spezielle Sprache zur Spezifikation von Formatdaten, EXPRESS genannt. Es werden umfassende Informationen zur Definition der geometrischen Form eines Produkts, einschließlich Topologie, Merkmale, Toleranzangaben und Materialeigenschaften geboten. Zusammengefasst bietet STEP alles, was zur vollständigen Definition eines Produktes nötig ist, und enthält alle notwendigen Informationen für die Bedürfnisse des DHM. Die größere Dateigröße und die sehr komplexe Dateistruktur im Vergleich zu anderen Formaten könnten im DHM-Kontext ein Hindernis darstellen (Bonin et al., 2014).

STL (Stereo Litographie or Standard Tessellation Language)

STL ist ein Dateiformat für Rapid Prototyping und computergestützte Fertigung. STL-Dateien beschreiben die Oberflächengeometrie eines dreidimensionalen Objekts ohne jegliche Darstellung von Farbe, Textur oder anderen üblichen CAD-Modellattributen (Ciobota, 2012). STL kann für einen ersten schnellen Blick geeignet sein und, aufgrund seiner geringen Dateigröße für die Zusammenarbeit im Internet. Wenn der Entwickler detailliertere Informationen benötigt, bieten andere Formate eine präzisere und skalierbare Struktur (Bonin et al., 2014).

Dateiformate für kinematische und kinetische Daten

Normalerweise ist der Motion-Capture-Anbieter ausschlaggebend für die Verwendung eines bestimmten Dateiformats. Da verschiedene Anbieter ihre eigenen Dateiformate entwickelt haben, ist es unwahrscheinlich, sie davon zu überzeugen, sich an ein einziges Standardformat zu halten. HTR von Motion

Analysis¹, ASF/AMC von Acclaim, BVA/BVH von Biovision, und V/VSK von Vicon² sind Beispiele für kommerziell verfügbare herstellerbasierte MoCap-Dateiformate.

ASF/AMC (Acclaim Skeleton File/Acclaim Motion Capture)

Die Dateiformate ASF und AMC wurden von Acclaim Entertainment Inc. entwickelt. Die ASF-Datei definiert die Skeletthierarchie, die Eigenschaften der Gelenke und Knochen und bietet optional Formdaten. Die AMC-Datei beschreibt die Bewegung, die sich auf das in der ASF-Datei definierte Skelett bezieht. Die ASF-Datei selbst ist in acht Abschnitte unterteilt: *Version, Name, Einheiten, Dokumentation, Wurzel, Knochendaten, Hierarchie, Haut*. Kommentare können durch ein vorangestelltes Rautezeichen „#“ hinzugefügt werden. Das Skelett ist knochenbasiert, Eltern-Kind-Beziehungen werden im Abschnitt über die Hierarchie beschrieben. Die gesamte Hierarchie ist relativ zur Wurzel, aber darüber hinaus hat jeder einzelne Bone seine eigene ID, seinen Namen, seine Richtung im globalen Raum, seine Längen, seine lokale Achse und seine Rotationsreihenfolge. DoF und Grenzen sind optional. Die vordefinierte Dateistruktur erlaubt keine Offsets zwischen Eltern- und Kind-Knochen in der Skeletthierarchie, bietet aber die Möglichkeit, Dummy-Knochen einzufügen, um die Lücken zu füllen, oder Teilungsnummern zu mehreren Knochen hinzuzufügen, die zum selben großen Segment gehören (Schafer, 1994). Aus diesem Grund hat die ASF-Datei im Vergleich zu anderen Dateiformaten wahrscheinlich mehr Segmente. Eine ASF-Datei kann mit mehreren AMC-Dateien verknüpft werden. Die AMC-Datei hat eine rudimentäre Struktur und enthält nur zwei Kopfzeilen, die den Dateiformattyp und die Rotationseinheiten definieren. Die Bewegungsdaten beginnen bildweise relativ zu den Definitionen in der ASF-Datei. Der Unterschied zu anderen Hierarchiedateiformaten besteht darin, dass die ASF/AMC-Dateien Positions- und Rotationsdaten für jeden Knochen enthalten, eine vollständig definierte Basisposition bieten, jeder Knochen seine eigene Rotationsreihenfolge haben kann und die ASF-Datei die Möglichkeit bietet, Dokumentations-, Form- und Masseninformationen hinzuzufügen. Der größte Nachteil ist, dass in der AMC-Datei weder die Abtastrate noch die Gesamtzahl der Frames angegeben ist, auch der Name der zugehörigen ASF-Datei fehlt (Müller, Röder & Clausen, 2007). Diese Aspekte können bei größeren Projekten zu Verwirrung führen und möglicherweise die Erkennung unvollständiger Bewegungsdatensätze erschweren (Bonin et al., 2014).

BVH (Biovision Hierarchical Data)

In der Animationsgemeinschaft ist Biovision Hierarchical Data (BVH) mit seinen Varianten (MNM; ASK/SDL) ein de-facto-Standard.

Das BVH-Dateiformat war eine Eigenentwicklung von Biovision, einem Unternehmen für Bewegungserfassung. Die Datei ist in zwei Hauptabschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt [Hierarchie] enthält eine gelenkbasierte Hierarchie und Winkelbeschränkungen für das Skelett, der zweite Abschnitt [Bewegung] enthält die Anzahl von Bildern, Bildraten und Bewegungsdaten. Die Skeletthierarchie basiert auf einem „ROOT“-Segment mit 3 Positions- und 3 Rotationskanälen. Alle anderen Segmente haben in der Regel nur 3 Rotationskanäle. Segmente werden abhängig in einer rekursiven Eltern-Kind-Struktur beschrieben, indem Offsets und Rotationsdaten für die „JOINT“-Knoten angegeben werden, bis ein „End Site“-Knoten erscheint. Der Knoten „End Site“ enthält nur Offset-Informationen und wird verwendet, um die Länge und Ausrichtung des letzten Segments abzuleiten. Es wird kein Skalierungsfaktor verwendet, so dass alle Segmente als starr angenommen werden (Menache, 2011). In den Standard-BVH-Dateien ist der Raum als rechtshändiges Koordinatensystem mit der Y-Achse als Aufwärtsvektor definiert. Die Reihenfolge der Euler-Winkel wird für jeden Knochen einzeln festgelegt, wobei es möglich ist, unterschiedliche Reihenfolgen für verschiedene Knochen zu haben (Meredith & Maddock, 2001). Der [Motion]-Teil der Datei ist entsprechend der in [Hierarchie] beschriebenen hierarchischen Ordnung aufgebaut. Jede Spalte enthält die Segmentkanäle, beginnend mit dem Wurzelsegment. Die erste Zeile enthält die anfängliche Kalibrierungspose, jede weitere Zeile steht für ein Bild der Bewegung. Die Dateistruktur ist sehr benutzerfreundlich und die Datei ist für statistische Analysen oder Tabellenkalkulationen leicht zugänglich. Die BVH-Dateistruktur hat einige kleinere Nachteile, z. B. bietet sie keine Informationen über

¹ <https://motionanalysis.com/>

² <https://www.vicon.com/index.html>

die Umgebung, keinen Platz für Kommentare und sie definiert keine Einheiten (z. B. der Messung der Offsets) (Bonin et al., 2014).

C3D

In der biomechanischen Motion-Capture-Gemeinschaft wird oft der Public-Domain-3D-Biomechanik-Datenstandard (C3D) (www.c3d.org), der unter anderem Schnittstellen zu DHM von AnyBody Technology, C-Motion, NexGen Ergonomics und Simi bietet, verwendet (Peters et al., 2019). Der C3D-Standard kann in den gängigsten Computerumgebungen Matlab (MathWorks) und LabView (National Instruments) verwendet werden (Abbildung 7).

Basic components	
Data	The C3D file is a binary file that stores raw 3D and analog information
Standard parameters	Default information about the raw 3D and analog data that is required to access the data
Custom parameters	Information specific to a particular Manufacturers' software application or test subject
Sections	
Header	A single 512-byte section
Parameters	One or more 512-byte blocks. The parameter section is variable in length, but it is typically at least 8–10 blocks in length
3D point/analog data section	One or more 512-byte blocks after the parameter section. The 3D and analog data section is variable in length depending on the amount of data stored. C3D files can contain any combination of 3D point data and analog data including 3D data only and analog data only.

Abbildung 7 C3D Dateiformat nach Peters et al. (2019) und Motion Lab Systems (2008)

Das C3D-Dateiformat wurde 1987 von Motion Lab Systems als standardisiertes Dateiformat für den Austausch von biomechanischen Daten zwischen verschiedenen Anwendungen entwickelt. Das C3D-Dateiformat ist eines der am häufigsten verwendeten Dateiformate in der Ganganalyse, Biomechanik und Bewegungserfassung. Die Datei enthält rohe oder verarbeitete Positionsdaten, analoge Beispieldaten und Informationen, die die gespeicherten Daten beschreiben, wie z. B. den physikalischen Aufbau des Labors, EMG-Kanäle (Elektromyographie), Abtastraten, Patienteninformationen, Gangzeit, Kraftmessplatten usw. Die Datei ist erweiterbar, d. h. es können nachträglich Daten hinzugefügt werden, ohne dass die vorherigen Informationen beeinträchtigt werden (Motion Lab Systems, 2008). Bei der Datei handelt es sich um ein binäres Dateiformat, aber aufgrund seiner öffentlichen Spezifikation und der frei verfügbaren C3D-Lesesoftware ist ein guter Überblick über die aufgezeichneten Daten möglich. Das C3D-Format ist nicht skelettbasiert, sondern spezifiziert die 3D-Trajektorien aller Marker (Müller et al., 2007). Das C3D-Format ist für die biomechanische Forschung bestens geeignet. Um ausschließlich Skelettbewegungen darzustellen, könnten andere skelettbasierte Dateiformate Vorteile haben (Bonin et al., 2014).

HTR (Hierarchical Translation-Rotation)

Das HTR-Format wurde von Motionanalysis entwickelt. Das HTR-Dateiformat bietet eine hierarchische Skelettstruktur, mit Rotations-, Translations- und Skalierungsinformationen für jedes Segment. Nach einem Rautezeichen „#“ können menschenlesbare Kommentare hinzugefügt werden. Die Datei besteht aus 4 Abschnitten, Header, SegmentNames&Hierarchy, BasePosition und RahmenDaten. Der Abschnitt [header] enthält wertvolle Informationen über die Bildrate, die Gesamtzahl der Bilder, die Definition der globalen Schwerkraftachse, die Anzahl der Segmente, die Eulersche Rotationsordnung, die Einheiten, die Knochenlängenachse und den Skalierungsfaktor. Die Datei bietet nur eine globale Eulersche Rotationsordnung, die auf alle Gelenke übertragen wird (Menache, 2011). Die Definition der Knochenlängenachse zwingt die Gelenkkoordinatensysteme (JCS) dazu, die definierte Achse immer auf die Richtung des nächsten Segmentknochens auszurichten (Meredith & Maddock, 2001). Der Abschnitt [SegmentNames&Hierarchy] definiert die Skeleton-Segmentnamen und zeigt die Eltern-Kind-Beziehungen. Mindestens ein Segment muss als global aufgeführt werden und dient als Wurzelknoten innerhalb

der Hierarchie. Als nützliches Feature bietet die Datei einen [BasePosition] Abschnitt, in dem die Position und die Knochenlängen der einzelnen Segmente des Skeletts vollständig definiert sind (Tx, Ty, Tz, Rx, Ry, Rz, BoneLengths). Der letzte Abschnitt [FrameData] enthält die Bewegungsdaten, die in Unterabschnitten pro Segment gespeichert sind. Jede Zeile innerhalb eines Unterabschnitts steht für eine Bildnummer. Das HTR-Dateiformat bietet einen gut dokumentierten Header mit allen notwendigen Informationen, die zur Rekonstruktion des Skeletts und der Bewegung benötigt werden. Die vollständig definierte Basis Position ist ein praktisches Merkmal. Ein Nachteil könnte darin bestehen, dass für alle Segmente nur eine Euler-Rotationsfolge angewendet wird. Die fest kodierten JCS- und Knochenlängengachsen könnten von den Entwicklern als Einschränkungen betrachtet werden. Aufgrund der Unterabschnitte pro Segment innerhalb der Bewegungsdaten ist die Datei nicht so einfach zu lesen wie beispielsweise das BVH-Format. Dieser Zustand verschlechtert sich mit der Gesamtzahl der Frames (Bonin et al., 2014).

Dateiformate umfassender Daten

COLLADA (COLLaborative Design Activity)

Das COLLADA-Dateiformat wurde 2004 von Sony Computer Entertainment, der Khronos Group und einem Konsortium von 3D-Softwareentwicklern entwickelt. COLLADA ist ein xml-basiertes, offenes Standardformat für den Austausch digitaler Assets zwischen Anwendungen. Es wurde 2012 als öffentliche Spezifikation (ISO/PAS 17506) in die ISO aufgenommen. Neben den statischen 3D-, Material- und Texturinformationen bietet COLLADA die Möglichkeit, der Datei Physik, Skelett, Animation und Kinematik hinzuzufügen. Materialien können sich gegenseitig referenzieren, z. B. zur Berechnung der Reibung. Bones können als hierarchisch abhängige statische oder animierte Objekte mit Rotations-, Translations- und Skalierungsinformationen definiert werden (Bonin et al., 2014).

FBX („Filmbox“)

FBX ist ein proprietäres 3D-Dateiformat, das 1996 von Kaydara entwickelt und 2006 von Autodesk Inc. übernommen wurde. Es ist eines der wichtigsten 3D-Austauschformate, das von vielen 3D-Tools verwendet wird (Blender, 2013). Obwohl Autodesk ein öffentliches SDK anbietet, ist FBX immer noch proprietär und hat keine offizielle Dokumentation außer der SDK-Dokumentation. Für eine detaillierte Beschreibung des SDK siehe AUTODESK (2013). Die Datei enthält ganze Szenen, einschließlich Geometrie, Lichter, Kameras, nicht-uniforme rationale B-Splines (NURBS), Skelett, Animation und Skinning. FBX SDK unterstützt das Lesen und Schreiben von Binär- und ASCII-Formaten. Aufgrund der fehlenden Dokumentation zum Dateiformat selbst sind Entwickler auf die Verwendung des SDKs angewiesen. Aufgrund dieser Einschränkungen ist dieses Format nicht als standardisierte DHM-Dateiformat-lösung geeignet (Bonin et al., 2014).

Schnittstellen

Ein Datenaustausch zwischen anthropologischen und biomechanischen DHM ist für die ergonomische Bewertung von biomechanischen Parameter als zusätzliche Information von Interesse (Paul & Lee, 2011; Peters et al., 2018; Peters et al., 2019). Zumindest die Vermengung von kognitiven, anthropometrischen und biomechanischen Modellen wäre für die Anwendung von DHM für Produktdesign und Produktionsprozesse von Vorteil (Bubb, 2019). Mit biomechanischen Modellen werden die Körperhaltungen nicht nur nach einem kategorischen Punktesystem oder einem Ampelschema bewertet, sondern auch nach den inneren Muskelkräften in Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen (Peters et al., 2019). Ein weiterer Bereich, in dem Datenaustauschprotokolle von Interesse sind, ist die Verbesserung der Bewegungssimulation (Keyvani et al., 2013). Trotz zahlreicher Ansätze gibt es jedoch keine universelle Lösung für den Datenaustausch zwischen verschiedenen DHM und zwischen DHM und anderen Systemen (Bonin et al., 2014; Keyvani et al., 2013; Paul & Wischniewski, 2012; Wegner, Chiang, Kemmer, Lämkuhl & Roll, 2007; Wischniewski, 2013).

Ein Datentransfer zwischen Komponenten der digitalen Ergonomie ist denkbar (Abbildung 8):

- zwischen CAD und DHM für die Bereitstellung von Umgebungsdaten innerhalb von DHM-Software-Anwendungen,
- zwischen verschiedenen DHM, um die unabhängigen Eigenschaften verschiedener DHM für die Durchführung einer vollständigen ergonomischen Analyse zu kombinieren,
- von MoCap zu DHM, um aufgezeichnete Haltungs- und Bewegungsdaten auf das DHM zu übertragen,
- zwischen verschiedenen MoCap.

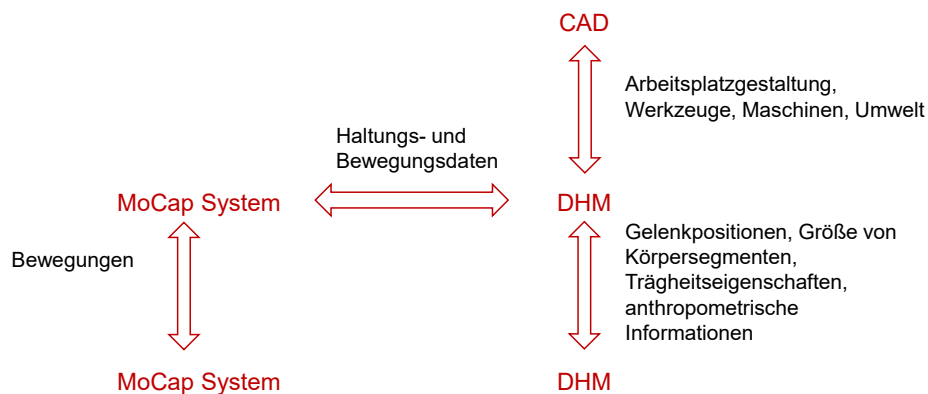


Abbildung 8 Schnittstellen zwischen den Systemkomponenten und Datenaustausch

Aspekte des Datenaustauschs

Ein umfassender Datenaustausch zwischen verschiedenen DHM wird durch unterschiedliche hierarchische Strukturen des menschlichen Skeletts, unterschiedliche Dateiformate, unterschiedliche Namenskonventionen, unterschiedliche Platzierung der Marker, unterschiedliche Freiheitsgrade (DoF) in bestimmten Gelenken, unterschiedliche Orientierungen und Bewegungsumfänge der Gelenke, unterschiedliche Orientierung und Rotation globaler und lokaler Koordinatensysteme und unterschiedliche Skalierungseinheiten erschwert (Keyvani et al., 2013). Die Vielfalt an Anwendungen und die Tatsache, dass sie von verschiedenen wissenschaftlichen Gruppen stammen, führten zu einem Chaos an Konventionen bei der Benennung von Knochen, Gelenken und Körpermerkmalen.

Beim Austausch von Daten zwischen DHM müssen verschiedene Bereiche berücksichtigt werden (Peters et al., 2019).

Anthropometrie

Anthropometrische Daten betreffen Körperlängen- und -breitenmaße, wie Körpergröße, Fuß- und Beinlänge, Hüft- und Schulterbreite, Handbreite, Taillenumfang und Skelettmaße. Um einheitliche Ergebnisse von DHM-Studien zu gewährleisten, wäre es hilfreich, sich auf bestehende internationale Normen für anthropometrische Daten oder Computerpuppen zu beziehen, wie z. B. DIN EN ISO 7250-1:2017-12, ISO/TR 7250-2:2010-02, DIN EN ISO 15535:2013-01, DIN EN ISO 15536-1:2008-12, DIN EN ISO 15536-2:2007-06 und ISO/IEC 19774 Teile 1 und 2:2019-11 (siehe Abschnitt **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**). Normen für volumetrische (das Volumen von Körpern betreffende) anthropometrische Maße müssen noch festgelegt werden (Peters et al., 2019).

Skalierung

In Bewegungsdaten-Dateien, die von den verschiedenen DHM importiert oder exportiert werden, werden unterschiedliche Konventionen verwendet. Übliche Einheiten für die Längsverschiebung sind entweder metrisch [mm, cm, m] oder [Zoll] und [Fuß]. Für die Angabe von Drehwinkeln werden in der Regel Grad oder Bogenmaß verwendet. Aufgrund regionaler Präferenzen und unterschiedlicher Hardware-Lösungen oder Software-Anwendungen sind standardisierte Einheiten für DHM-Bewegungsdaten schwer zu erreichen (Peters et al., 2019).

Biomechanik (Kinematik und Kräfte)

Kinematische Daten, die Bewegungen beschreiben, sind ein wesentlicher Bestandteil des Datenaustauschs zwischen DHM. Es können jedoch mehrere Inkompatibilitäten auftreten:

- *Uneinheitliche Strukturen des Körperskeletts.*
Im Kontext der digitalen Menschmodellierung ist ein gemeinsames Element aller gelenkigen Körper ein Körperskelett („rig“). Ein Körperskelett ist ein Satz hierarchischer starrer Segmente, die durch Gelenke verbunden sind, die die Bewegungen des menschlichen Körpers realisieren. Bei festen Segmentlängen kann eine Bewegung durch eine Reihe von Änderungen der Gelenkwinkel definiert werden, die die Ausrichtung jedes Segments relativ zu seinem proximalen Segment bestimmen. Die Konfiguration dieser hierarchischen Strukturen ist bei virtuellen Menschen nicht einheitlich festgelegt (Keyvani et al., 2013).
- *Unterschiedliche Markersets und -positionierungen bei der Bewegungsaufzeichnung und unterschiedliche Ansätze zur Berechnung der Gelenkmittelpunkte aus Markerpositionen.*
Die Anzahl und Platzierung der Marker ist je nach Hersteller der MoCap-Ausrüstung und auch je nach Forschungsgruppe unterschiedlich. Jeder Anbieter schlägt in der Regel eine Reihe von Marker-Set-Vorlagen vor, die sich von einer Anwendung zur anderen unterscheiden können.
In der Literatur werden viele verschiedene Methoden zur Berechnung der gemeinsamen Gelenkmittelpunkte vorgeschlagen. Eine von Ehrig, Taylor, Duda und Heller (2006) durchgeführte Studie hat viele dieser Methoden verglichen und klassifiziert. Manchmal wird der optische Marker selbst nicht korrekt bezeichnet, eine Markierung mit dem Namen „Hand“ kann sich beispielsweise auf eine Markierung auf der Handfläche, dem Handrücken oder der Spitze des Zeigefingers beziehen (Keyvani et al., 2013).
- *Unterschiedliche Anzahl von Freiheitsgraden (Degrees of Freedom DoF) in den Gelenken.*
Im Allgemeinen kann ein Segment im Raum durch sechs Parameter (drei translatorische und drei rotatorische) vollständig definiert werden. Bei gelenkigen Körpern ist es ratsam, auch einen Längenfaktor zu berücksichtigen, der die Längenänderungen der einzelnen Segmente während der Animation bestimmt. Wenn man jedoch eine Reihe von hierarchischen Segmenten mit 7 Freiheitsgraden (DoF) für jedes Segment ausstattet, muss man sich mit einer enormen Komplexität und rechnerischen Redundanzen auseinandersetzen. Die meisten MoCap-Systeme haben die Möglichkeit, eine oder mehrere dieser DoF zu beschränken. Allerdings kann es an dabei zu Mismatches zwischen den DHM kommen (Keyvani et al., 2013).
- *Unterschiedliche globale Position (und Translation eines Körpers im Raum) und lokale Position (und Translation von Gliedmaßen und Körpersegmenten über Gelenken).*
Feste Knochen oder virtuelle Gelenke sind die Knochen/Gelenke, die keinen Freiheitsgrad

haben. Der Grund für die Definition eines solchen Gelenks ist in der Regel die Schaffung eines konstanten Offsets relativ zum übergeordneten Gelenk ohne Verwendung von Translationsdaten in der Transformationsmatrix. Für die Bewegung des übergeordneten Gelenks zum untergeordneten Gelenk können zwei verschiedene Methoden (Transformationsmatrix, Definition eines Dummy Segments) verwendet werden (Keyvani et al., 2013).

- *Unterschiede in den Konventionen zur Reihenfolge der Rotation.*
Bei der Verwendung von Bewegungserfassungsdaten für DHM-Anwendungen ist in den meisten Fällen eine Konvertierung in die gelenkspezifischen Konventionen des Manikins erforderlich. Sowohl in Motion-Capture-Dateien als auch in DHM-Tools ist die Verwendung der Euler-Konvention zur Definition von Drehwinkeln und der Ausrichtung von Segmenten im Raum weit verbreitet, aber eben kein definierter Standard. Für die Definition der Objektausrichtung im Raum gibt es auch andere Methoden wie Rotationsmatrizen, Vektorengel und Quaternionen (Keyvani et al., 2013).
- *Unterschiedliche Definitionen der Grundstellung.*
Grundstellung, Schlüsselstellung oder neutrale Stellung sind gängige Begriffe, die jedoch im Bereich der Bewegungserfassung keine einheitliche Bedeutung haben (eine stehende Haltung mit fast 90 Grad seitlich geöffneten Armen (T-Pose genannt), eine stehende Haltung mit Armen neben dem Körper in entspannter Position u.a.) (Keyvani et al., 2013).
- *Konvention zur Schwerkraftachse.*
Einige Anwendungen bevorzugen die -Y-Richtung zur Darstellung der Schwerkraftrichtung, während andere die -Z-Richtung als Schwerkraftachse verwenden. Auch zwischen den Normen besteht keine Einigkeit über die Richtung der Schwerkraft relativ zum globalen Koordinatensystem. Beispielsweise schlägt die Norm ISO 15536-2 (2007) die Z-Achse vor, während die Norm H-Anim (2006) die Y-Achse als Aufwärtsrichtung vorschlägt (Keyvani et al., 2013).
- *Unterschiede im gemeinsamen Koordinatensystem.*
Für einen hierarchischen Gelenkkörper sind lokale Koordinatensysteme für jedes Gelenk erforderlich, um die kinematischen Vorwärtsgleichungen zu lösen. Nachdem diese Gelenkkordinatensysteme definiert sind, werden nicht nur die Ausrichtung und die Verschiebung jedes untergeordneten Gelenks in Bezug auf das übergeordnete Gelenk bestimmt, sondern auch die Ausrichtung des distalen Segments (Richtung des Knochens) definiert (Keyvani et al., 2013).

Reaktionskraftdaten bei biomechanischen Analysen sind wichtig für inverse dynamische Berechnungen zur Bestimmung der inneren Körperkräfte und -momente. Doch nur wenige Dateiformate berücksichtigen externe Kräfte. Der Austausch von Kraftdaten über andere Dateiformate ist nicht standardisiert und daher kompliziert. In einigen Fällen sind viel Raffinesse und ein höherer Programmieraufwand erforderlich (Peters et al., 2019).

Verfahren des Datenaustauschs

Schnittstellen zwischen DHM

In den letzten Jahren wurden einige Schnittstellen zum Datenaustausch zwischen verschiedenen DHM-Systemen entwickelt (Tabelle 5). Allen gemeinsam sind die individuellen, maßgeschneiderten Lösungen (Bonin et al., 2014).

Tabelle 5 Studien, in denen ein Datenaustausch zwischen DHM realisiert wurde

Autoren	Titel	Jahr	Ergonomie	Systeme	Schnittstelle
Paul, G.; Lee, W. C.	Interfacing Jack and Anybody: Towards anthropometric musculoskeletal digital human modeling.	2011	n.s.	AMS; Jack	Interface Programm

Jung, M.; Damsgaard, M.; Andersen, M. S.; Rasmussen, J.	Integrating biomechanical manikins into a CAD environment	2013	Haltungsanalyse; Kraftanalyse	SolidWorks Assembly, AMS	Interface
Krüger, D.; Wartzack, S.	Towards CAD integrated simulation of use under ergonomic aspects	2014	Kraftanalyse	CAD model; OpenSim	interface between OpenSim and CAD Creo/ Parametric
Peters, M., Quadrat, E., Nolte, A., Wolf, A., Miehling, J., Wartzack, S.	Biomechanical Digital Human Models: Chances and Challenges to Expand Ergonomic Evaluation	2018	Lastenhandhabungsanalyse	AMS; ema	BVH Daten
Peters, M.; Wischniewski, S.	Evaluation of physical workload using simulation versus motion capturing data for biomechanical models	2020	Lastenhandhabungsanalyse	AMS; ema	BVH Daten
Ulherr, A. & Bengler, K.	Umfassende Diskomfortbewertung für Autoinsassen durch Simulation: U-DASim	2016	Diskomfort	AMS; CASIMIR; RAMSIS	Schnittstellenplattform

Zur Modellierung von Haltungsänderungen unter mechanischer Belastung wurde von Paul und Lee (2011) ein Schnittstellenprogramm entwickelt, das die Funktionen von AMS und JACK kombiniert. Diese Software wurde durch die PYTHON-Programmierschnittstelle, die in der JACK-Software enthalten ist, ermöglicht. Da die beiden menschlichen Modelle ein unterschiedliches internes Körpermodell (biomechanisches Modell) mit einer uneinheitlichen Anzahl von Gelenken und Segmenten verwenden, wurden 26 gemeinsame Gelenke, die für die Skelettstruktur von Bedeutung sind, für eine gemeinsame biomechanische Struktur ausgewählt. Die Jack-Koordinatensysteme wurden neu ausgerichtet, um der Ausrichtung der Gelenkkoordinatensysteme in AMS bei der Jack-to-AnyBody (J2A)-Translation zu folgen, und die JACK-Gelenkpositionen wurden zur Skalierung des AMS-Skeletts verwendet. Bei der umgekehrten Translation wurde nach der Durchführung einer inversen kinematischen Analyse in AMS der Bewegungsumfang (ROM) jedes Gelenks zwischen AMS und JACK koordiniert, um die ROM-Einschränkungen von JACK zu berücksichtigen. Die AMS-Gelenkkoordinatensysteme wurden dann neu ausgerichtet, um der Ausrichtung der JACK-Gelenke in der Phase AnyBody-to-Jack (A2J) zu folgen (Abbildung 9).

	Human Joint	Segments	Location	ROM (deg)			Orientation JCS wrt. GCS
	(JACK)	Connection	(Positions, m)	R(x),R(-x)	R(y),R(-y)	R(z),R(-z)	
6	L4L3	L4 & L3	(0.056, 1.032, 0.000)	-6.5 - 11.5	-1.5 - 1.5	-4.0 - 4.0	Rotate AC 90° about Y-axis
7	L5L4	L5 & L4	(0.054, 0.988, 0.000)	-8.7 - 15.3	-2.0 - 2.0	-4.0 - 4.0	Rotate AC 90° about Y-axis
8	Waist	Lower Torso & L5	(0.05, 0.946, 0.000)	-4.0 - 4.0	-6.5 - 11.0	-2.0 - 2.0	Rotate C 90° about X-axis
9	R. Shoulder	R. Clavicle & R. Upper Arm	(0.037, 1.344, 0.175)	-48.0 - 180.9	-61.4 - 187.6	-108.5 - 71.5	Rotate AC 90° about X-axis
10	L. Shoulder	L. Clavicle & L. Upper Arm	(0.037, 1.344, -0.175)	-48.0 - 180.9	-61.4 - 187.6	-108.5 - 71.5	Rotate AC 90° about X-axis

	Human Joint	Segments	Location	ROM (deg)			Orientation JCS wrt. GCS
	(ANYBODY)	Connection	(Positions, m)	R(x),R(-x)	R(y),R(-y)	R(z),R(-z)	
6	L4L3	L4 & L3	(0.0019, 1.055, 0.000)	-6.67 - 6.67	-7.5 - 7.5	-15.0 - 5.0	Same as GCS
7	L5L4	L5 & L4	(0.0026, 1.021, 0.000)	-6.67 - 6.67	-7.5 - 7.5	-15.0 - 5.0	Same as GCS
8	Waist	Sacrum & L5	(-0.0037, 0.989, 0.000)	-6.67 - 6.67	-7.5 - 7.5	-15.0 - 5.0	Same as GCS
9	R. Shoulder	R. Scapula & R. Humerus	(-0.037, 1.408, 0.193)	-120 - 120	-90 - 90	0 - 140	Rotate C 90° about Y-axis
10	L. Shoulder	L. Scapula & L. Humerus	(-0.037, 1.408, -0.193)	-120 - 120	-90 - 90	0 - 140	Rotate C 180° about X-axis, Rotate AC 90° about Y-axis

	Human	Jack	ROMdeg		Rotational	AnyBody	ROMdeg		Common Model	ROMdeg	
	Joint	R(x),R(-x)	R(y),R(-y)	R(z),R(-z)	Matrix	R(x),R(-x)	R(y),R(-y)	R(z),R(-z)	R(x),R(-x)	R(y),R(-y)	R(z),R(-z)
6	L4L3	-6.5 - 11.5	-1.5 - 1.5	-4.0 - 4.0	R(y,-90)	-6.67 - 6.67	-7.5 - 7.5	-15.0 - 5.0	-4.0 - 4.0	-1.5 - 1.5	-6.5 - 11.5
7	L5L4	-8.7 - 15.3	-2.0 - 2.0	-4.0 - 4.0	R(y,-90)	-6.67 - 6.67	-7.5 - 7.5	-15.0 - 5.0	-4.0 - 4.0	-2.0 - 2.0	-8.7 - 15.3
8	Waist	-4.0 - 4.0	-6.5 - 11.0	-2.0 - 2.0	R(x,90)	-6.67 - 6.67	-7.5 - 7.5	-15.0 - 5.0	-4.0 - 4.0	-2.0 - 2.0	-6.5 - 11.0
9	R.Shou.	-48.0 - 180.9	-61.4 - 187.6	-108.5 - 71.5	R(y,-90)R(x,-90)	-120 - 120	-90 - 90	0 - 140	-61.4 - 187.6	-108.5 - 71.5	-48.0 - 180.9
10	L.Shou.	-48.0 - 180.9	-61.4 - 187.6	-108.5 - 71.5	R(y,-90)R(x,90)	-120 - 120	-90 - 90	0 - 140	-61.4 - 187.6	-108.5 - 71.5	-48.0 - 180.9

Abbildung 9 Auszug aus den Modellcharakteristiken von Jack (oben), AMS (Mitte) und gemeinsames ROM Modell ausgewählter Gelenke (unten), aus Paul und Lee (2011)

Jung, Damsgaard, Andersen und Rasmussen (2013) präsentieren den SolidWorks2AnyBody Übersetzer, der es ermöglicht, Mechanismen mit hoher Komplexität, die als SolidWorks-Baugruppen definiert sind, in die AnyBody-Modellierungssprache AnyScript zu exportieren. Diese Funktion wurde als Add-In für die Anwendungsprogrammierschnittstelle von SolidWorks entwickelt. Über diese Schnittstelle kann das Modell nach AnyBody exportiert und einer Muskel-Skelett-Analyse unterzogen werden. Die Ergebnisse können zurückübertragen und mit Hilfe des digitalen Manikins in der SolidWorks-Umgebung angezeigt werden.

Krüger und Wartzack (2014) verwenden eine ähnliche Idee: ein anthropometrisches Menschmodell (Hautmodell) in einer CAD-Umgebung dient als Frontend für eine Weiterverarbeitung, d. h. die Definition geometrischer Beziehungen zwischen Nutzer und Produkt, um eine Simulation in einem muskuloskelettalen Modell (OpenSIM) durchzuführen. Die Verbindung zwischen beiden Modellen erfolgt über einen Skalierungsvorgang und eine anschließende räumliche (Punkt-zu-Punkt) Registrierung der beiden Modelle (Abbildung 10).

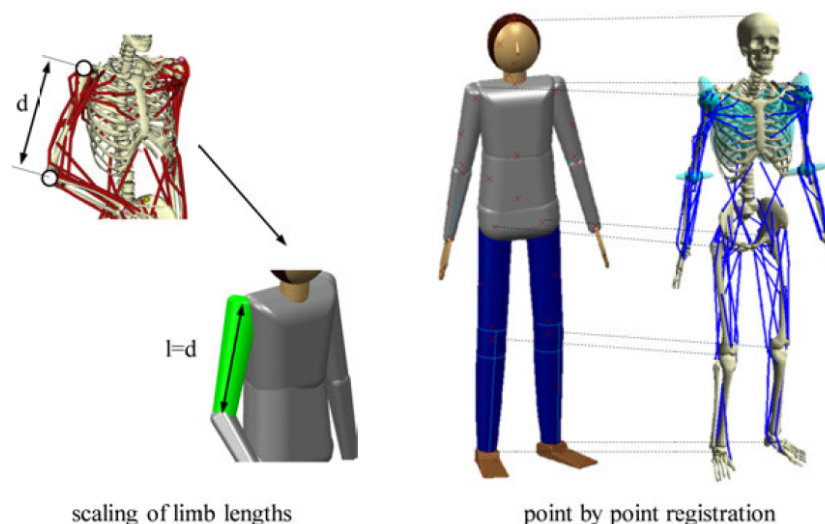


Abbildung 10 Übertragung von Daten zwischen Hautmodell und Muskel-Skelett-Modell in Krüger und Wartzack (2014)

Um die ergonomische Bewertung mit biomechanischen Parametern anzureichern, wurde im Forschungsvorhaben "ema2AnyBody" eine Schnittstelle zwischen einem biomechanischen Menschmodell (AnyBody) und dem „Editor für manuelle Arbeitstätigkeiten“ (ema) eingerichtet und genutzt (Peters et al., 2018; Peters & Wischniewski, 2020) (Abbildung 11).

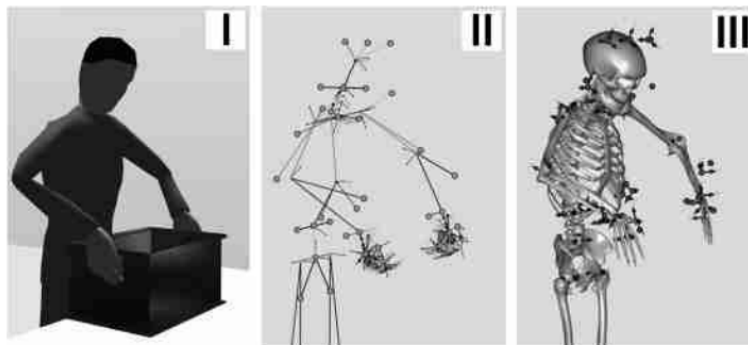


Abbildung 11 Datenverarbeitung von ema (I) zu AnyBody (III) mit einer Stabfigur (II) in Peters et al. (2018)

Im UDASim Projekt (Umfassende Diskomfortbewertung für Autoinsassen durch Simulation, 2013–2016) wurde in Kooperation von Wölfel, Human Solutions, Anybody Technologies, TU München und den Autoherstellern BMW, Daimler und Ford eine Schnittstellenplattform für Menschmodelle (CASIMIR, RAMSIS und AnyBody) zur Bereitstellung der Eingangsparameter für eine umfassende Diskomfortbewertung eines Autofahrers mit neuronalen Netzen entwickelt (Abbildung 12). Dazu wurde eine gemeinsame Skelettstruktur festgelegt, um Informationen über die Gelenkposition über das BVH Format zu übertragen (Ulherr & Bengler, 2016).

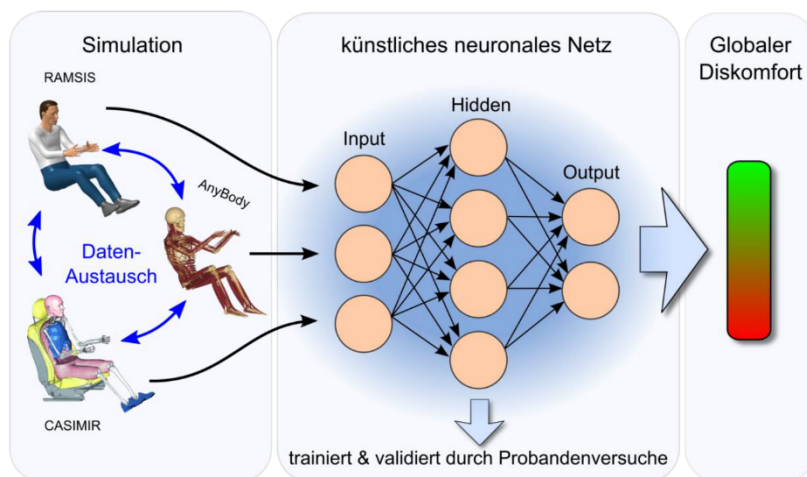


Abbildung 12 UDASim – Softwarearchitektur

SomaDynamics, ein innovativer Softwareentwickler für die Automobilbranche, hat die Software SOMAKIN entwickelt- Dies ist eine Schnittstelle, die digitale Manikin-Programme wie Jack® und Ramsis mit der Anybody-Technologie verbindet³.

Pooling/Master Modell

Einige Studien schlagen vor, verschiedene Skelette über ein Standard- oder Referenzskelett ineinander zu migrieren (Tabelle 6).

Tabelle 6 Studien, in denen ein Standard- oder Referenzskelett vorgeschlagen wurde

Autoren	Titel	Jahr	Verfahren
Aberman, K., Li, P., Lischinski, D., Sorkine-Hornung, O., Cohen-Or, D. & Chen, B..	Skeleton-aware networks for deep motion retargeting	2020	Pooling/Unpooling

³ <https://www.somadynamics.com.au/api-projects.html>

Monzani, J.-S., Baerlocher, P., Boulic, R. & Thalmann, D.	Using an intermediate skeleton and inverse kinematics for motion retargeting	2000	Intermediate Skeleton
Terlemez, Ö., Ulbrich, S., Mandery, C., Do, M., Vahrenkamp, N. & Asfour, T.	Master motor map (MMM) – framework and toolkit for capturing, representing, and reproducing human motion on humanoid robots	2014	Master Motion Map
Azad, P., Asfour, T. & Dillmann, R.	Toward an unified representation for imitation of human motion on humanoids	2007	Master Motion Map

Aberman et al. (2020) schlagen ein „Skelett-Pooling“ vor, mit dem verschiedene homöomorphe Skelette durch eine Abfolge von Verschmelzungsoperationen, auf ein gemeinsames Ursprungsskelett für die Bewegung in einen gemeinsamen latenten Raum reduziert werden können. Somit kann ein Austausch einfach durch Kodierung in und Dekodierung aus diesem latenten Raum erreicht werden (Abbildung 13).

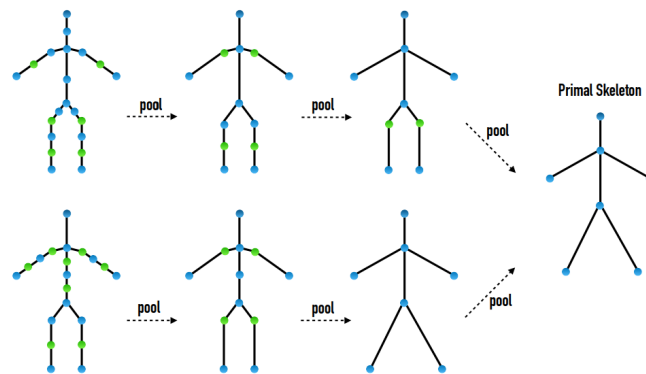
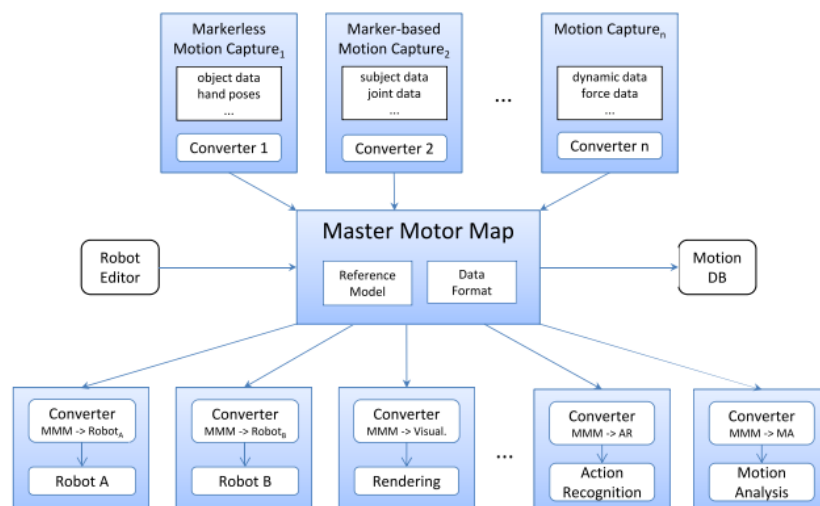


Abbildung 13 Pooling zum Urskelett nach Aberman et al. (2020)

Monzani et al. (2000) regen für die Vereinheitlichung von verschiedenen Skelettkonfigurationen in einer Datenbank ein Zwischenskelett an, um ein DHM in ein anderes umzuwandeln. Dazu wird zunächst ein Standardskelett mit einer durchgängigen Gelenkdefinition (z.B. H-Anim, siehe Abschnitt Standards), die alle verfügbaren Gelenke in verschiedenen Bewegungsdateien enthält, vordefiniert. Dann kann jede neue Bewegung zunächst auf dieses Standardskelett umgetargetet und anschließend gespeichert werden.

Ähnlich sieht der Ansatz von Terlemez et al. (2014) und Azad, Asfour und Dillmann (2007) aus, die ein Referenzmodell des menschlichen Körpers, die Master Motor Map (MMM), als einheitlichen Rahmen für die Erfassung menschlicher Bewegungen, ihre Darstellung in Standarddatenstrukturen und -formaten sowie ihre Wiedergabe auf humanoiden Robotern vorschlagen (Abbildung 14).



Import von MoCap-Daten in DHM

In den Publikationen wird eine Vielzahl von MoCap Systemen erwähnt, mit denen Bewegungen zur Weiterverarbeitung in DHM-Systemen aufgezeichnet werden (Tabelle 7).

Tabelle 7 Studien, in denen ein Datenaustausch zwischen MoCap-Daten und DHM realisiert wurde

Autoren	Titel	Jahr	Ergonomie	Systeme	Formate
Alexander, N.; Schwameder, H.; Baker, R.; Trinler, U.	Effect of different walking speeds on joint and muscle force estimation using AnyBody and OpenSim	2021	Ganganalyse; Kraftanalyse	Nexus → AMS, → OpenSim	GRF-Daten, Filter
Asadi, F.; Arjmand, N.	Marker-less versus marker-based driven musculoskeletal models of the spine during static load-handling activities	2020	Lastenhandhabungsanalyse	Kinect, Nexus → AMS	n.s.
Babicsné Horváth, Mária; Herczegfi, Károly	Early results of a usability evaluation of two digital human model-based ergonomic software applying eye-tracking methodology comparison of the usability of ViveLab and Jack software	2019	Haltungsanalyse, RULA	Xsens → Jack, → ViveLab	n.s.
Behjati, M. & Arjmand, N.	Biomechanical assessment of the NIOSH lifting equation in asymmetric load-handling activities using a detailed musculoskeletal model	2019	Lastenhandhabungsanalyse; NIOSH	Nexus → AMS	n.s.
Deuse, Jochen; Grötsch, Alexander; Stankiewicz, Lukas; Wischniewski, Sascha	A customizable digital human model for assembly system design	2016	Haltungsanalyse, REBA	Kinect → DHM	C# Code
Fonk, R., Schneeweiss, S., Simon, U. & Engelhardt, L.	Hand motion capture from a 3D leap motion controller for a musculoskeletal dynamic simulation	2021	Bewegungsanalyse	LMC → AMS	Python-based interface, BVH, AnyScript
Kong, Y.-K., Choi, K.-H., Cho, M.-U., Kim, S.-Y., Kim, M.-J., Shim, J.-W.	Ergonomic assessment of a lower-limb exoskeleton through electromyography and Anybody modeling system	2022	Haltungsanalyse	Xsens → AMS	n.s.
Nimbarte, A. D., Sun, Y., Jaridi, M. & Hsiao, H.	Biomechanical loading of the shoulder complex and lumbosacral joints during dynamic cart pushing task	2013	Lastenhandhabungsanalyse	Nexus → AMS	C3D
Peters, M. & Wischniewski, S.	Evaluation of physical workload using simulation versus motion capturing data for biomechanical models	2020	Lastenhandhabungsanalyse	Perception Neuron → AMS; → ema	BVH
Seiferheld, Bo	Biomechanical investigation of a passive upper extremity exoskeleton for manual material handling	2021	Kraftanalyse	Xsens → AMS	BVH
Tröster, M., Budde, S., Maufroy, C., Andersen, M. S., Rasmussen, J., Schneider, U. et al.	Biomechanical analysis of stoop and free-style squat lifting and lowering with a generic back-support exoskeleton model	2022	Lastenhandhabungsanalyse	Qualisys → AMS	C3D

Tröster, M., Wagner, D. W., Müller-Graf, F., Maufroy, C., Schneider, U. & Bauernhansl, T.	Biomechanical model-based development of an active occupational upper-limb exoskeleton to support healthcare workers in the surgery waiting room	2020	Lastenhandhabungsanalyse	Qualisys → AMS	n.s.
Zhou, J.	Physical stresses on caregivers when repositioning patients in bed	2020	Lastenhandhabungsanalyse	n.s. → AMS	n.s.
Hermesdorf, H.; Hofmann, N.; Keil, A.	Bewertung digital erfasster Bewegungen mit Dynamicus	2016	Haltungsanalyse; Kraftanalyse	ART → Dynamicus	Dynamicus/Recorder
Walther, M.; Muñoz, B.T.	Integration of time as a factor in ergonomic simulation	2012	Haltungs-, Kraft-, Lastenhandhabungsanalyse, EAWS	ART → Dynamicus	n.s.
Caporaso, T.; Di Gironimo, G.; Tarallo, A.; Martino, G. de; Di Ludovico, M.; Lanzotti, A.	Digital human models for gait analysis: Experimental validation of static force analysis tools under dynamic conditions	2017	Ganganalyse	BTS SMART-DX → Jack	open data exchange format (i.e., C3D)
Choi, N.-C; Lee, S.H.	Discomfort evaluation of truck ingress/egress motions based on biomechanical analysis	2015	Haltungsanalyse	Vicon → LifeMOD	self data
Chang, J., Chablat, D., Bennis, F. & Ma, L.	Muscle fatigue analysis using opensim	2017	Ganganalyse	Motion Analysis Corporation → OpenSim	n.s.
Hamner, S. R., Seth, A. & Delp, S. L.	Muscle contributions to propulsion and support during running	2010	Kraftanalyse; Ganganalyse	Motion Analysis Corporation → OpenSim	n.s.
Trinler, U.; Baker, R.	Estimated landmark calibration of biomechanical models for inverse kinematics	2018	Ganganalyse	Nexus → OpenSim	n.s.

Deuse, Grötsch, Stankiewicz und Wischniewski (2016) beschreiben die Bewegungserfassung mit Microsoft Kinect und die anschließende Parametrisierung des DHM mit eigenentwickelten C# Code.

Für den Vergleich von mit AMS und OpenSim berechneten Gelenkdruck- und Muskelkräften nutzten N. Alexander, Schwameder, Baker und Trinler (2021) ein Vicon Nexus System. Sowohl Kinematik- als auch GRF-Daten wurden in der AMS-Umgebung unter Verwendung eines 5 Hz- bzw. 12 Hz-Tiefpass-Butterworth-Filter 2 gefiltert. Die gleichen Filterparameter wurden für OpenSim verwendet, wobei die GRF-Daten in Matlab⁴ gefiltert wurden. Die Belastungsvorhersagen für den Lumbosakralbereich (L5-S1) eines Kinect-gesteuerten und eines, auf Goldstandard-Markern basierenden, Vicon-gesteuerten Muskel-Skelett-Modells wurden von Asadi und Arjmand (2020) in AMS für verschiedene stehende statische Lasthandhabungsaktivitäten bei unterschiedlichen Höhen/Asymmetriewinkeln/Distanzen verglichen. Auch weitere Arbeitsgruppen arbeiten im Anybody Modelling System mit Xsens-, Kinect-, Nexus-, Qualisys- oder mit anderen Geräten aufgezeichneten Bewegungsdaten (Behjati & Arjmand, 2019; Fonk, Schneeweiss, Simon & Engelhardt, 2021; Kong et al., 2022; Nimbarte, Sun, Jaridi & Hsiao, 2013; Seif-erheld, 2021; Tröster et al., 2020; Tröster et al., 2022; Zhou, 2020).

Das Tool Dynamicus/Recorder, das eine Schnittstelle zwischen Dynamicus und Tracking-Systemen wie dem ART Motion Capture-System, Vicon oder Kinect hat, wurde unter dem Aspekt der effizienten Implementierung und der komfortablen Benutzung verschiedener Bewertungsverfahren gestaltet (Hermesdorf, Hofmann & Keil, 2016; Walther & Muñoz, 2012). Dynamicus/Recorder unterstützt den Benutzer auch bei der Ermittlung anthropometrischer Daten und bei der Modell-Sensor-Kalibrierung.

⁴ https://de.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab

Babicsné Horváth und Hercegi (2019) vergleichen eine cloudbasierte ungarische Software, ViveLab, die eine Möglichkeit zum Importieren von CAD-Modellen und Xsens-Bewegungserfassungsdateien hat, mit dem DHM Jack. Caporaso et al. (2017) untersuchten die Nutzung von Jack für die Abschätzung der Belastungen des Bewegungsapparats unter Nutzung von mit dem MoCap System BTS SMART-DX aufgezeichneten Bewegungsdaten.

Die Bewegungen einer Person beim Betreten und Verlassen von Lkw-Kabinen mit unterschiedlichen Arten, Anzahlen und Höhen von Tritten wurden mit dem DHM LifeMOD und von Vicon Kameras aufgenommenen Bewegungsdaten von Choi und Lee (2015) analysiert.

Chang, Chablat, Bennis und Ma (2017), Hamner, Seth und Delp (2010) und Trinler und Baker (2018) haben mit der OpenSource Plattform OpenSim in Kombination mit dem Motion Analysis Corporation System bzw. Nexus System gearbeitet.

Standards

Umfang der Standardisierung

Grundlegend wichtig ist nach Paul und Wischniewski (2012) eine einheitliche anatomische Struktur des Menschen, mit definierten globalen und lokalen Koordinatensystemen, konsistenter Benennung und Nummerierung von Gliedmaßen oder Gelenken mit ihren entsprechenden einheitlichen Freiheitsgraden. Weiterhin muss ein DHM-Standardverfahren und ein parametrisches Modell für die Verknüpfung anthropometrischer Datenbanken (DIN EN ISO 15535:2013-01) mit einer definierten DHM-Menschenstruktur in Betracht gezogen werden, um repräsentative Proportionen für eine ausgewählte Bevölkerung zu erstellen. Außerdem muss sichergestellt werden, dass verfügbare anthropometrische Daten (DIN EN ISO 7250-1:2017-12) zur Kalibrierung des digitalen Menschenmodells verwendet werden können.

Ein DHM-Standarddatenmodell sollte einen Eingabeteil umfassen, der Informationen zur Beschreibung der Modellstruktur, zur Parametrisierung der Strukturkomponenten (z. B. Gliedmaßengröße, Bewegungsumfang), zu anthropometrischen Annahmen, Festpunkten und kinematischen Treibern enthält, sowie einen Ausgabeteil, der die Art und die Ergebnisse der mit einem DHM durchgeführten Simulationen dokumentiert (Paul & Wischniewski, 2012).

Im Allgemeinen beginnen Normungsaktivitäten mit der Terminologie, dann werden die Validierungs- oder Verifizierungsmethoden genormt. Darüber hinaus stellt das ISO Technical Committee TC 159 (Ergonomie) Normen für Dateninhalte bereit. Das ISO Technical Committee 133 (Größensysteme für Bekleidung) und das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) konzentrieren sich auf die spezielle Anwendung von E-Commerce in der Bekleidungs- und Textilindustrie. In diesem Anwendungsbereich werden Qualitätskontrollmethoden für die einzelnen digitalen Menschmodelle benötigt. TC 133 plant, grundlegende Terminologie und Validierungsmethoden festzulegen, während das IEEE versucht, praktische Detailstandards zu entwickeln, die die ISO-Standards ergänzen. Außerdem ist das IEEE an Standards für digitale Dateiformate interessiert (Mochimaru, 2019).

Stand der Standardisierung

Im Juli 2011 hat das Technische Komitee der International Ergonomics Association (IEA) für Humansimulation und virtuelle Umgebungen ein Unterkomitee für die DHM-Normung gegründet, um einen Rahmen für die Standardisierung digitaler Menschmodelle zu schaffen (Paul & Wischniewski, 2012). Es kam jedoch schnell Gegenwind, woraufhin das Projekt fallen gelassen wurde. Inzwischen sind Informatiker aus dem Spiele- und Videobereich in den Bereich DHM eingedrungen und haben ihre Standards mitgenommen bzw. sehr schnell etabliert. Auf diesen könnte man auch für die Arbeitswissenschaft aufbauen.

In der Arbeitsgruppe für Anthropometrie und Biomechanik des ISO Technical Committees TC 159 (Ergonomie) wurden Normen für den digitalen Menschen erarbeitet. Eine weitere Normungsaktivität zur digitalen Menschmodellierung in ISO TC 133 bezieht sich auf die Größenbestimmung von Bekleidung (Mochimaru, 2019).

Die Internationale Organisation für Normung (ISO) bietet mit der Reihe DIN EN ISO 15536 (DIN EN ISO 15536-1:2008-12; DIN EN ISO 15536-2:2007-03) eine Grundnorm für Computer Manikins mit Gelenkfreiheitsgraden. ISO 15536-1 enthält die Grundsätze und die Terminologie des digitalen Menschen und ISO 15536-2:2007-03 enthält Verifizierungs- und Validierungsmethoden für kommerziell erhältliche digitale menschliche Systeme. Die detaillierten Normen der Reihe ISO 7250 liefern den Standard der Terminologie und der Messmethoden für Körpermaße, DIN EN ISO 15535:2013-01 (DIN EN ISO 15535) bezieht sich auf menschliche Körpermaße und deren Speicherung in Datenbanken.

In den letzten Jahren wurden 3D-Scansysteme zur digitalen Modellierung des Menschen und zur Größenbestimmung eingesetzt. Daher hat TC 159 die Standards für die Qualitätskontrolle von 3D-Scansystemen festgelegt. DIN EN ISO 20685-1:2019-03 bietet Qualitätsschwellen für vom Scan abgeleiteten Messungen, um die Vergleichbarkeit mit der traditionellen Anthropometrie zu gewährleisten.

Die Reihe DIN ISO 18825:2017-04 enthält die Terminologie des virtuellen menschlichen Körpers. Die für die Größenbestimmung von Bekleidung erforderlichen Körpermaße sind in der ergonomischen Norm DIN EN ISO 7250-1:2017-12 nicht enthalten; daher wurde eine weitere Normenreihe ISO 8559:2017-03, eingeführt. ISO 8559-1:2017-03 enthält viele Umfangsmaße, während DIN EN ISO 7250-1:2017-12 hauptsächlich Längsmaße der Gliedmaßen und Funktionsmaße (z. B. Sitzhöhe, Reichweite nach vorn) enthält.

Allgemeine Empfehlungen für Körperkoordinatensysteme und kinematische Daten wurden von der International Society of Biomechanics (ISB) vereinbart (Wu & Cavanagh, 1995). Die ISB gibt auch Empfehlungen für die Standardisierung der Berichterstattung über kinematische Daten (Wu et al., 2002; Wu et al., 2005).

Das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ist eine der größten Organisationen, die internationale „Forum“-Normen entwickelt. Im Jahr 2015 hat das IEEE einen neuen technischen Ausschuss für die Standardisierung der Verarbeitung von 3D-Körperdaten für Bekleidung gegründet. Mehrere Arbeitsgruppen entwickeln Standards für Terminologie, Qualität, Metadatenformat, Sicherheit und Datenschutz sowie Geschäftsschnittstellen.

TC, WG		Terminology and basic structures	Validation and verification	Data contents
TC 159/SC 3	Traditional anthropometry	ISO 7250-1		ISO/TR 7250-2
	3D body scanning	ISO 20685-1	ISO 20685-1 ISO 20685-2	
	Digital human systems	ISO 15536-1	ISO 15536-2	
TC 133/WG 2	Traditional anthropometry	ISO 8559-1		
	Digital fitting systems	ISO 18825-1 ISO 18825-2	ISO/CD 20947-1	
IEEE SA	Traditional anthropometry	Additional measurements	Landmarking skills	
	3D body scanning	Metadata format		

IEEE SA, Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association; ISO, the International Organization for Standardization; TC, technical committee.

Abbildung 15 Strukturelle Übersicht der Normen für digitale Menschmodelle nach Mochimaru (2019)

Der VDI e.V. gibt er als einer der wichtigsten Regelsetzer pro Jahr bis zu 250 VDI-Richtlinien heraus. In der Norm VDI 4499-4:2015-03 (VDI 4499-4) werden digitale Menschmodelle im Rahmen der Fabrikplanung, insbesondere der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung, vorgestellt und die wesentlichen rechtlichen Aspekte der Menschmodellierung herausgestellt. Die digitale Modellierung von arbeitenden Menschen in Kombination mit Arbeitsmitteln in einer Arbeitsumgebung (d. h. mit Maschinen, Anlagen, Transportmitteln, etc.) wird beschrieben, um ergonomische, arbeitsmethodische und zeitökonomische Aspekte zu analysieren und zu bewerten (Zülch, 2013).

Die HAnim-Arbeitsgruppe⁵ entwickelt und demonstriert den internationalen Standard für Humanoide Animation (HAnim). Die Reihe ISO/IEC 19774 (ISO/IEC 19774-1:2019-11; ISO/IEC 19774-2:2019-11) spezifiziert eine Systematik zur Darstellung von Humanoiden in einer netzwerkfähigen 3D-Grafik- und Multimediaumgebung (u.a. Namen, Positionen, Gelenke, Hierarchien, Beziehungen, Mapping, Datenstrukturen). Der H-Anim-Standard (ISO/IEC 19774-1:2019-11; ISO/IEC 19774-2:2019-11) schlägt vor, Modelle mit unterschiedlichen Artikulationsgraden (LOA) zu berücksichtigen. Der Artikulationsgrad (LOA) steht für die Komplexität und den Detaillierungsgrad der Gelenke einer humanoiden Skeletthierarchie und kann zur Erzeugung verschiedener Bewegungen auf der Grundlage der Gelenke verwendet werden. Es gibt fünf Ebenen der Artikulation (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**):

- LOA-0 repräsentiert nur das Objekt humanoid_root Joint ohne eine begleitende Hierarchie, wie in (a) dargestellt.

⁵ <https://www.web3d.org/working-groups/humanoid-animation-hanim>

HAnim unterstützt eine Vielzahl von gelenkigen Figuren - einschließlich anatomisch korrekter menschlicher Modelle - mit haptischen und kinematischen Schnittstellen, um gemeinsam nutzbare Skelette, Körper und Animationen zu ermöglichen. ISO/IEC 19774:2019-11 enthält die vollständigen normativen und informativen Angaben zur Spezifikation einer abstrakten menschlichen Form.

Akteure und Konferenzen

Digital Human Modeling ist im Vergleich zu anderen Ingenieurgesellschaften eine relativ kleine Gemeinschaft (Demirel et al., 2022). Mitte der 90er Jahre entstand die Idee eine spezielle Konferenz zu veranstalten, die alle auf dem Gebiet des DHM tätigen Personen zusammenbringt, um Ideen und Erfahrungen auszutauschen. Die Konferenz wurde organisiert von der SAE (Society of Automotive Engineers). Im Jahr 2010 wurde entschieden, die DHM-Konferenzen künftig unter dem Dach der International Ergonomic Association (IEA) durchzuführen. Die DHMC ist nun alle 3 Jahre Teil des IEA-Kongresses (Bubb, 2019). Abbildung 17 zeigt die wichtigsten Konferenzen mit DHM-Fachprogrammen und -schienen.

Technical Programs and Tracks	Affiliated Conferences
International Conference on Digital Human Modeling & Applications in Health, Safety, Ergonomics & Risk Management	International Conference on Human-Computer Interaction (HCIII)
Human Modeling-Methods and Applications in Engineering	International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC-CIE)
Design Automation Conference – Human-Centered Design	
International Conference on Digital Human Modeling and Applied Optimization	International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE)
Digital Human Modeling Symposium	International Ergonomic Association (IEA)
Design, Systems and Complexity	International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE)
Technical Group in Human Performance Modeling	The Human Factors and Ergonomics Society (HFES)
International Symposium Human Modeling and Simulation in Automotive Engineering	Carhs.Training GMBH
International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies	3DBODY.TECH Conferences – Hometrica Consulting, Switzerland
International Conference on Biorobotics and Human Modeling	World Academy of Science, Engineering and Technology

Abbildung 17 Große internationale Konferenzen mit spezifischen DHM-Programmen oder -Schienen (aus Demirel et al. (2022))

Abbildung 18 fasst eine Liste der Hochschulen zusammen, die eine aktive Forschungsgruppe haben, in der mindestens ein Principal Investigator (PI) seine Forschungs- und Lehrtätigkeit auf das DHM konzentriert.

Affiliated Laboratory, Research Center, or Department/School	Institution	DHM Principal Investigator
North America		
Virtual Solider Research	The University of Iowa, USA	Karim Abdel-Malek Jasbir S. Arora Kevin Kregel
Human Motion Simulation Laboratory	University of Michigan, USA	Stephen Baek Matthew P. Raed Don B. Chaffin Clive D'Souza Vincent G. Duffy Norman Badler H. Onan Demirel Matthew Parkinson James Yang Xianlian Alex Zhou Jan M. Allbeck Kang Li Chang Shu
School of Industrial Engineering Center for Human Modeling and Simulation Design Engineering Lab Open Design Lab Human-Centric Design Research Laboratory BioDynamics Laboratory Games and Intelligent Animation Laboratory Department of Orthopedics Digital Human Modeling Project	Purdue University, USA University of Pennsylvania, USA Oregon State University, USA Pennsylvania State University, USA Texas Tech University, USA New Jersey Institute of Technology, USA George Mason University, USA Rutgers University, USA Carleton University, Canada	
Europe		
Ergonomics at Department of Mechanical Engineering	The Technical University of Munich, Germany	Klaus Bengler Heiner Bubb Dan Höglberg Lars Hanson Roland Ortengren Cecilia Berlin
User Centered Product Design	University of Skövde, Sweden	Johan S. Carlsson Russell Marshall Steve Summerskill Keith Case
Product and Production Development	Chalmers University of Technology, Sweden	Toon Huysmans Giuseppe Andreoni John Rasmussen Caterina Rizzi Sofia Scataglini Nadia Magnenat-Thalmann Gregor Harth Xuguang Wang Menelaos Pappas
Geometry and Motion Planning Design Ergonomics Research Group	Fraunhofer-Chalmers Research Center for Industrial Mathematics, Sweden Loughborough University, United Kingdom	
Industrial Design Engineering The Laboratory Sensibilab Department of Materials and Production Department of Management, Information and Production Engineering Department of Product Development MIRALab The Laboratory for Intelligent CAD systems The French Institute of Science and Technology for Transport Department of Mechanical Engineering & Aeronautics	Delft University of Technology, Netherlands Politecnico di Milano, Italy Aalborg University, Aalborg, Denmark University of Bergamo, Italy University of Antwerp, Belgium University of Geneva, Switzerland University of Maribor, Slovenia Université de Lyon, France University of Patras, Greece	
Asia		
Department of Industrial Engineering and Engineering Management Department of Industrial Engineering	National Tsing Hua University, Taiwan Tsinghua University, China	Jun-Ming Lu Mao-Jiun Wang Liang Ma Zhizhong Li Mitsunori Tada Akhiko Mural
Digital Human Research Group	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan	Ravindra S. Goonetilleke Yan Tina Luximon Wookjin Park Thaneswer Patel Günther Paul Shuping Xiong Heecheon You
Human Performance Laboratory Asian Ergonomics Design Lab Life Enhancing Technology Laboratory Department of Agricultural Engineering Australian Institute of Tropical Health and Medicine Human Factors and Ergonomics Lab Ergonomic Design Technology Lab	The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong Seoul National University, South Korea North Eastern Regional Institute of Science and Technology, India James Cook University, Australia Korea Advanced Institute of Science and Technology, South Korea Pohang University of Science and Technology, South Korea	

Abbildung 18 Akademische Gruppen und Forschungsleiter in der DHM-Forschung (aus Demirel et al. (2022))

Zusammenfassung

Hintergrund

Digitale Ergonomie wird als Oberbegriff für digitale Modelle und Methoden zur Planung und Beurteilung von Produkten und Prozessen in sozio-technischen Arbeitssystemen verstanden. Im Mittelpunkt digitaler Ergonomie stehen Digitale Menschmodelle (DMM bzw. Digital Human Models DHM), die in einer Umgebung (CAD, virtuelle Realität) platziert und dann manipuliert (Haltung, Bewegung, Kräfte) werden, um arbeitswissenschaftliche Kenngrößen zu ermitteln. Die einzelnen Komponenten (CAD, DHM, Bewegungserfassung MoCap) weisen eine enorme Vielfalt an Softwarelösungen unterschiedlicher Entwickler auf, was es schwierig macht, Ergebnisse zu verbreiten und zu vergleichen oder Forschungsideen auszutauschen. Fehlende Kompatibilität macht die Zusammenführung und Auswertung vorhandener Daten auch für den Arbeitsschutz unmöglich.

Im Hinblick auf eine Harmonisierung digitaler arbeitswissenschaftlicher Beurteilungs- und Bewertungsverfahren enthält dieser Bericht eine Bestandsaufnahme und Auswertung wissenschaftlicher Publikationen zu Schnittstellen von Bewegungsdaten, kinematischen Modellen und Visualisierungsmethoden. Zum Verständnis der Hürden und Probleme für eine mögliche Standardisierung von Schnittstellen und Dateiformaten wird deren Vielfalt aufgezeigt und systematisiert.

Grundsätzlich ist ein Datentransfer notwendig:

- zwischen CAD und DHM für die Bereitstellung von Umgebungsdaten innerhalb von DHM-Software-Anwendungen,
- zwischen verschiedenen DHM, um die unabhängigen Eigenschaften verschiedener DHM für die Durchführung einer vollständigen ergonomischen Analyse zu kombinieren,
- von MoCap zu DHM, um aufgezeichnete Haltungs- und Bewegungsdaten auf das DHM zu übertragen,
- zwischen verschiedenen MoCap.

Probleme

Durch eine große Variabilität in verschiedenen Bereichen wird solch ein Datenaustausch erschwert:

- Dateiformate (für geometrische, kinematische und kinetische Daten)
Es gibt eine unendliche Vielfalt an Dateiformaten, von denen zwar einige für den Datenaustausch gängig sind, jedoch keine offiziell als Standard anerkannt wurden. Für den Austausch von Daten zwischen DHM-Systemen wäre es sinnvoll, ein herstellernerutrales, gut dokumentiertes, standardisiertes Format zu haben. Da verschiedene Anbieter ihre eigenen Dateiformate entwickelt haben, ist es unwahrscheinlich, sie davon zu überzeugen, sich an ein einziges Standardformat zu halten.
- anthropometrische Größen und Körpermaße
Es gibt eine Vielzahl an anthropometrischen Datenbanken, die verschiedene Bevölkerungsgruppen repräsentieren und unterschiedliche statistische Aufschlüsselungen und Gruppierungen der Populationen ermöglichen.
- Skalierung und Einheiten
Regionale Präferenzen und unterschiedliche Hardware-Lösungen oder Software-Anwendungen bestimmen Skalierung und Einheiten für Längsverschiebungen oder Drehwinkel, standardisierte Einheiten sind schwer zu erreichen.
- Definition globaler und lokaler Koordinatensysteme
Es werden verschiedene globale und lokale Koordinatensysteme eingesetzt, um z.B. die kinematischen Vorwärtsgleichungen zu lösen.
- Konvention zur Schwerkraftachse
Einige Anwendungen bevorzugen die -Y-Richtung zur Darstellung der Schwerkraftrichtung, während andere die -Z-Richtung als Schwerkraftachse verwenden.

- Definitionen der Grundstellung
Grundstellung, Schlüsselstellung oder neutrale Stellung sind gängige Begriffe, die jedoch im Bereich der Bewegungserfassung keine einheitliche Bedeutung haben.
- Benennung von Segmenten, Knochen, Gelenken und Körpermerkmalen
Die Benennung von Segmenten, Knochen, Gelenken und Körpermerkmalen ist uneinheitlich.
- Strukturen des Körperskeletts
Die Konfiguration der hierarchischen Strukturen von Segmenten und Gelenken ist bei virtuellen Menschen nicht einheitlich festgelegt.
- Freiheitsgrade (DoF) in Gelenken, Orientierungen und Bewegungsumfänge der Gelenke
Eine vollständige Definition gelenkiger Körper 7 DoF was zu einer enormen Komplexität und rechnerischen Redundanzen führt. Die meisten MoCap-Systeme beschränken eine oder mehrere dieser DoF, dabei kommt es zu Mismatches zwischen den DHM.
- globale und lokale Position
Für die Bewegung des übergeordneten Gelenks zum untergeordneten Gelenk werden zwei verschiedene Methoden (Transformationsmatrix, Definition eines Dummy Segments) verwendet.
- Konventionen zur Reihenfolge der Rotation
Sowohl in Motion-Capture-Dateien als auch in DHM-Tools ist die Verwendung der Euler-Konvention zur Definition von Drehwinkeln und der Ausrichtung von Segmenten im Raum weit verbreitet, aber eben kein definierter Standard.
- Bewegungserfassungsdaten
Für mit MoCap Systemen erfasste Bewegungsdaten existiert aktuell kein einheitliches und strukturiertes System und keine einheitliche Lösung für die Sammlung von Bewegungserfassungsdaten aus verschiedenen Quellen in einer Datenbank. DHM-Tools sind somit nicht in der Lage, diese Daten effizient zu nutzen.
- Markierungssets und -positionierungen
Anzahl und Platzierung der Marker bei der Bewegungsaufzeichnung und Ansätze zur Berechnung der Gelenkmittelpunkte aus Markerpositionen sind je nach Hersteller der MoCap-Ausrüstung und auch je nach Forschungsgruppe unterschiedlich. Manchmal wird der optische Marker selbst nicht korrekt bezeichnet, eine Markierung mit dem Namen „Hand“ kann sich beispielsweise auf eine Markierung auf der Handfläche, dem Hand-rücken oder der Spitze des Zeigefingers beziehen.
- Arbeitswissenschaftliche Analysen
Je nach Zielstellung der Entwicklung sind einzelne oder mehrere der Verfahren in unterschiedlichsten Konstellationen in das DHM integriert.
- Reaktionskraftdaten
Der Austausch von Kraftdaten über andere Dateiformate ist nicht standardisiert und daher kompliziert. In einigen Fällen sind viel Raffinesse und ein höherer Programmieraufwand erforderlich.

Lösungsvorschläge

In den letzten Jahren wurden einige Schnittstellen zum Datenaustausch zwischen verschiedenen DHM-Systemen entwickelt, allen gemeinsam sind jedoch die individuellen, maßgeschneiderten nicht verallgemeinerbaren Lösungen. Es wurde auch vorgeschlagen, verschiedene Skelette über ein Standard- oder Referenzskelett ineinander zu migrieren. Zur Aufzeichnung von Bewegungen zur Weiterverarbeitung in unterschiedlichen DHM-Systemen wird eine Vielzahl von MoCap Systemen eingesetzt, entsprechend vielfältig sind Individuallösungen zum Datenaustausch zwischen MoCap-Daten und DHM. Aktuell sehen mehrere Autoren kaum Möglichkeiten zur Etablierung von Standards für den Datenaustausch zwischen verschiedenen DHM und zwischen DHM und anderen Systemen (Bonin et al., 2014; Keyvani et al., 2013; Paul & Wischniewski, 2012; Peters et al., 2019), auch wenn der potenzielle Nutzen vielfach betont wird. Jung et al. (2013) halten es jedoch für möglich Schnittstellen zu entwickeln, die ein beliebiges parametrisches und merkmalsbasiertes CAD-System mit einem kommerziellen DHM mit Anwendungsprogrammierschnittstelle verbinden.

Bonin et al. (2014) unterscheiden grundsätzlich zwischen drei Dateiformaten:

- Dateiformate für geometrische Informationen (statische 3D-Festkörper, anthropometrische Daten),

- Dateiformate für kinematischen und kinetischen Daten (hierarchische Skelettstrukturen oder Marker-Bewegungen),
- Dateiformate umfassender Daten wie Geometrie, Dynamik und Struktur.

Für den Austausch von statischen 3D-Daten innerhalb von DHM-Systemen ist es sinnvoll, ein herstellernerutrales, gut dokumentiertes, standardisiertes Format zu haben. Für eine Echtzeitsimulation ist es vorteilhaft, ein kleines Dateiformat zu wählen und nicht ein sehr detailliertes. Daher empfehlen Bonin et al. (2014) basierend auf Dateigröße, Dokumentationsqualität, Standardisierungsgrad und Popularität das JT Format und für den Austausch von Bewegungsdaten das BVH-Format. Für die genaue anthropometrische Darstellung sehen sie ein Dateiformat nach DIN EN ISO 15535:2013-01 als die umfassendste und sicherste Lösung an. Das SDK-Format ist aufgrund der fehlenden Dokumentation zum Dateiformat nicht als standardisierte DHM-Dateiformatlösung geeignet (Bonin et al., 2014).

Für die Bewältigung von Inkompatibilitätsproblemen von Bewegungsdatenbanken sehen Keyvani et al. (2013) die Nutzung lokal entwickelter mathematischer Funktionen als vielversprechende Lösung an. Dafür sind zusätzliche Berechnungen erforderlich, wenn die Bewegungen in die Datenbank importiert werden. Damit würde sich jedoch die Leistung der Datenbank für künftige Verwendungen erheblich verbessern, da alle in die Datenbank importierten Bewegungen anschließend generisch und direkt vergleichbar sind.

An der Standardisierung digitaler Menschmodelle wird von verschiedenen Akteuren gearbeitet, bisher beschränken sich gültige Nomen jedoch hauptsächlich auf die Anthropometrie. Grundlegend wichtig wäre eine einheitliche anatomische Struktur des Menschen, mit definierten globalen und lokalen Koordinatensystemen, konsistenter Benennung und Nummerierung von Gliedmaßen oder Gelenken mit ihren entsprechenden einheitlichen Freiheitsgraden (DHM-Standardverfahren). Als richtungweisend für ein Schnittstellen-Standardformat im Bereich digitale Ergonomie erweist sich der Standard ISO/IEC 19774:2019-11, der detaillierte Vorstellungen zu Bezeichnungen, Positionen, Gelenken, Hierarchien, Beziehungen, Mapping und Datenstrukturen enthält, die als Basis für ein „Zwischen“-Standard- oder Referenzskelett beim Transfer von einem DHM zum anderen oder als „Master“-Skelett für die Zusammenführung und Auswertung vorhandener Daten dienen können.

Teil II – Hintergrund, Methodik

Hintergründe

Die Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN) ist ein Projekt des Vereins zur Förderung der Arbeitssicherheit in Europa e. V. (VFA). Der VFA verfolgt den Zweck, die Arbeitssicherheit zu fördern und die Harmonisierung der Normung in Europa sicherzustellen. Die KAN hat die Aufgabe, die Normungsarbeit zu beobachten und die Belange des Arbeitsschutzes gegenüber der Normung zur Geltung zu bringen.

Dazu konzeptioniert und begleitet die KAN auch Studien zur Analyse von Normungsfeldern und setzt deren Ergebnisse um. Als ein aktuell relevantes Thema hat die KAN die digitale Ergonomie identifiziert, die derzeit in Forschungseinrichtungen und privatwirtschaftlichen Unternehmen mittels unterschiedlicher Analyse-, Beurteilungs- und Darstellungsmethoden und -werkzeuge angewandt wird. Diese sind aufgrund unterschiedlicher Datenformate untereinander nicht kompatibel, so dass eine Zusammenführung und Auswertung vorhandener Daten z. B. für den Arbeitsschutz unmöglich ist. Im Hinblick auf eine harmonisierte arbeitswissenschaftliche Beurteilung und Bewertung digitaler Mensch-Maschine-Modelle und eine normative Festlegung von digitalen Methoden zur menschengerechten Arbeitsgestaltung wäre daher eine Standardisierung der Schnittstellen von Bewegungsdaten, kinematischen Modellen und Visualisierungsmethoden hilfreich. Zur Beurteilung der Machbarkeit einer Standardisierung wurde eine Bestandsaufnahme und Auswertung der arbeitswissenschaftlichen Erkenntnisse in Bezug auf digitale Menschmodelle und der digitalen Erfassung, Bewertung und Darstellung von biomechanischen Daten durchgeführt.

Vorgehensweise

Die Recherche zur Identifizierung wissenschaftlicher Publikationen zu arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen in Bezug auf digitale Menschmodelle orientierte sich an den Prinzipien einer systematischen Übersichtsarbeit (Higgins & Green, 2011). Seit den 1990er Jahren hat die Forderung nach evidenzbasierter Praxis stark zugenommen, was sich in einer steigenden Anzahl von publizierten Übersichtsarbeiten widerspiegelt. Der methodische Ansatz und entsprechende Richtlinien wurden vor allem im Bereich der Medizin entwickelt und für zahlreiche andere Bereiche adaptiert (Arksey & O'Malley, 2005; Bragge et al., 2011; Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2014; Centre for Evidence-based Conservation, 2010; Centre for Reviews and Dissemination, 2009; Daudt, van Mossel & Scott, 2013; European Food Safety Authority, 2010; Hidalgo Landa, Szabo, Le Brun, Owen & Fletcher, 2011; Higgins & Green, 2011; Hoffmann et al., 2017; Kohl et al., 2013; Levac, Colquhoun & O'Brien, 2010; Miake-Lye, Hempel, Shanman & Shekelle, 2016; Sargeant, Amezcua, Rajic & Waddell, 2005; U.S. Food and Drug Administration, 2009).

Die Literaturrecherche wurde nach den Grundsätzen eines Scoping Reviews durchgeführt. Ein Scoping Review „befasst sich mit einer explorativen Forschungsfrage, die darauf abzielt, Schlüsselkonzepte, Arten von Evidenz und Forschungslücken in Bezug auf einen bestimmten Bereich oder ein bestimmtes Feld durch systematische Suche, Auswahl und Synthese des vorhandenen Wissens zu erfassen“ (Colquhoun et al. 2014). Generell können Scoping-Studien „darauf abzielen, die einem Forschungsbereich zugrunde liegenden Schlüsselkonzepte und die wichtigsten Quellen und Arten der verfügbaren Nachweise schnell zu erfassen“, und können durchgeführt werden „insbesondere wenn ein Bereich komplex ist oder noch nicht umfassend untersucht wurde“ (Arksey & O'Malley, 2005).

Die Methodik des Scoping Reviews ist nicht so stark in Richtlinien festgehalten, wie es für Systematic Reviews der Fall ist. Dennoch haben sich einige methodische Publikationen als Standard etabliert (Arksey & O'Malley, 2005; Daudt et al., 2013; Hidalgo Landa et al., 2011; Levac et al., 2010; Tricco et al., 2018).

Die Methode dient dazu, relevante Literatur unabhängig vom Studiendesign zu identifizieren. Daher berücksichtigen Scoping Reviews insbesondere auch graue Literatur, nach der ebenfalls mit einem systematischen Ansatz recherchiert wird (Godin, Stapleton, Kirkpatrick, Hanning & Leatherdale, 2015).

Arksey & O'Malley, 2005 beschreiben fünf Schritte der Durchführung eines Scoping Reviews:

- Schritt 1: Definition der Forschungsfrage(n);
- Schritt 2: Systematische Suche nach relevanten Studien;
- Schritt 3: Studienelektion nach vordefinierten Ein-/ Ausschlusskriterien;
- Schritt 4: Datenextraktion und -verarbeitung;
- Schritt 5: Zusammenstellung, Synopse und Bericht der Ergebnisse.

Die Arbeiten wurden nach der BioMath-internen Standardarbeitsanweisung für die Entwicklung eines Review Protokolls und Dokumentation des Reviews (siehe Anhang) durchgeführt, welche sich an diesen Standards orientiert.

Schritt 1 Definition der Forschungsfrage

Ziel des Reviews war die Suche nach arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen in Bezug auf digitale Menschmodelle und die digitale Erfassung, Bewertung und Darstellung von biomechanischen Daten. Die Literaturrecherche zielte darauf ab, Publikationen (zu Studien, Forschungsprojekten) zu identifizieren, die menschliche Arbeiten/Bewegungen anhand digitaler Menschmodelle analysieren und im Hinblick auf die Gestaltung ergonomischer Produkte und sozio-technischer Arbeitssysteme ausgewertet haben. Dabei stand der Aspekt der Datenformate und Schnittstellen im Fokus.

Diese Review-Frage war vom DMO-Typ mit den drei Schlüsselementen Data (D); Models (M) und Outcomes (O), siehe Tabelle 8.

Tabelle 8 Schlüsselemente der Suchfrage

Schlüsselement	Spezifikation
Data	Bewegungsdaten, biomechanische Daten, Schnittstellen, Datenformate Sicht, Maße, Kraft, Handlung, Zeit, Wege, ... Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz
Methods	Digitale Ergometrie, Digitale Mensch-Modelle, biomechanische Modellrechnungen, kinematische Modelle, Visualisierungsmethoden
Outcomes	Arbeitsgestaltung, arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse

Schritt 2 Systematische Suche nach relevanten Studien

Zum internationalen Stand der Wissenschaft und Forschung wurde eine umfassende Literaturrecherche in englischer Sprache in elektronischen Datenbanken durchgeführt. Zunächst wurden die Suchbegriffe definiert (Tabelle 9), mit den aus den Suchbegriffen abgeleiteten Suchgleichungen wurde die Suchanfrage an die ausgewählten Datenbanken (Tabelle 10) gestellt.

Tabelle 9 Definition der Suchbegriffe

Schlüsselement	Spezifikation	Suchbegriffe
Data	Datenaustausch	exchang* OR import OR export OR interfac* OR "file format" OR "data format"
Methods	Digitale Mensch-Modelle, MotionCapture Systeme	„digital human model*“, „ digital human manikin*“, „digital human mannequin*“, mocap
Outcomes	arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse	ergonom*

Tabelle 10 Wissenschaftliche Literaturdatenbanken

Name (Anbieter)	Internet-Adresse
PubMed (National Library of Medicine)	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/
Scopus (Elsevier)	https://www.scopus.com/home.uri
Web of Science (Clarivate Analytics)	https://clarivate.com/products/web-of-science/

Weiterhin erfolgte eine Suche nach grauer Literatur über die Google Advanced Search (nach BioMath Standardarbeitsanweisung). Darüber hinaus wurden die Webseiten von Institutionen, die sich mit dem Thema befassen (z.B. AnyBody Technology, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit BAuA), nach grauer Literatur/Projektberichten durchsucht.

Nach der Suche in Literaturdatenbanken und der Suche nach grauer Literatur wurde manuell eine Rückwärtsreferenzsuche mit Schlüsselpublikationen (insbesondere Reviews) durchgeführt.

Alle identifizierten Publikationen wurden in der Referenzmanagementsoftware Citavi⁶ unter Angabe ihrer Quelle (Literaturdatenbank, freie Suche, Webseiten, Rückwärtssuche) verwaltet (Abbildung 19).

⁶ Citavi 6 for Windows, Copyright © 2022 by Swiss Academic Software GmbH. All rights reserved.

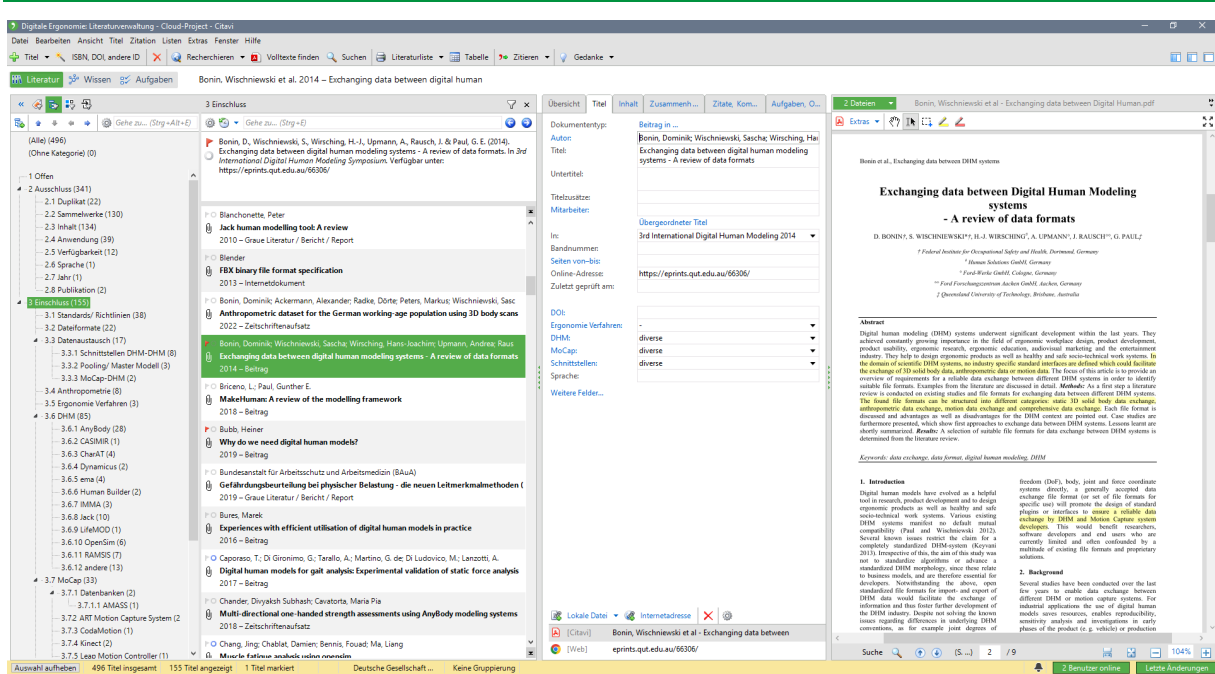


Abbildung 19 Literaturverwaltung

Schritt 3 Studienselektion nach vordefinierten Ein-/Ausschlusskriterien

Neben den Schlüsselementen wurden weitere Selektionskriterien für die Auswahl geeigneter Publikationen angewandt (Tabelle 11).

Tabelle 11 Selektionskriterien für beide Suchfragen

Schlüsselement	Spezifikation
Jahr der Veröffentlichung	nach 2000 (Ausnahme: Beschreibung von Dateiformaten)
Sprache der Veröffentlichung	englisch, deutsch
Publikationstyp	Zeitschriftenartikel, Review, Projektbericht, Hochschulschrift, Behördenbericht
Ort der Studie	keine Einschränkungen
Zugriff auf die Veröffentlichung	voller Zugriff auf den Volltext

Die Artikel wurden in zwei Schritten selektiert: zunächst wurden die Titel und Abstracts der identifizierten Referenzen vorwiegend anhand der Einschlusskriterien gesichtet und die Ausschlüsse dokumentiert. Anschließend wurden die Volltexte der Manuskripte gescreent.

Eingeschlossene Publikationen wurden gemäß ihren Inhalten einer oder mehreren Kategorien zugeordnet:

- Standards/Richtlinien
- Dateiformate
- Anthropometrie
- Datenaustausch
- Ergonomie Verfahren
- DHM
- MoCap
- Virtual Reality.

Um die methodische Qualität der Studien zu beurteilen, wurde eine kritische Bewertung ihrer wissenschaftlichen Belastbarkeit durchgeführt. Es gibt mehrere Instrumente zur Bewertung der Qualität von Studien, sowohl für die Bewertung veröffentlichter Studien (Berichterstattungsleitlinien) als auch für die Bewertung des Verzerrungsrisikos von Studien (Risk of Bias - Bewertungsinstrumente). Für diesen Review wurden vier Kriterien definiert, die sich auf die Qualität und Aussagekraft der Studien im Hinblick auf die Fragestellung des Reviews bezogen:

- Q1: Ist die Studie vollständig und verständlich beschrieben?
- Q2: Sind die Methoden vollständig und verständlich präsentiert?
- Q3: Sind die eingesetzten Systeme vollständig und verständlich beschrieben?
- Q4: Sind die Ergebnisse der Studie detailliert beschrieben?

Jedes dieser Kriterien wurde auf einer Skala von -1 bis 1 bewertet (-1 nein, 0: teilweise, 1: ja). Die Einzelscores wurden zu einem Summenscore addiert, um Studien mit einem Summenscore kleiner 2 ausschließen zu können.

Es wurden nur die Studien bewertet, die sich mit dem Datenaustausch zwischen Systemen befassen. Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Es wurde keine Publikation aus Qualitätsgründen ausgeschlossen.

Tabelle 12 Qualitätsbewertung der Studien

Summen-score	Anzahl	Studien
4	21	Aberman et al. (2020), N. Alexander et al. (2021), Azad et al. (2007), Babicsné Horváth und Hercegfi (2019), Caporaso et al. (2017), Choi und Lee (2015), Deuse et al. (2016), Fonk et al. (2021), Hermsdorf et al. (2016), Jung et al. (2013), Krüger und Wartzack (2014), Monzani, Baerlocher, Boulic und Thalmann (2000), Nimbarte et al. (2013), Paul und Lee (2011), Peters et al. (2018), Peters und Wischniewski (2020), Terlemez et al. (2014), Trinler und Baker (2018), Tröster et al. (2022), Tröster et al. (2020)
3	6	Asadi und Arjmand (2020), Behjati und Arjmand (2019), Hamner et al. (2010), Kong et al. (2022), Seiferheld (2021), Walther und Muñoz (2012)
2	1	Zhou (2020)

Die Selektion und die Zuordnung von Kategorien wurden in der Literaturverwaltung dokumentiert (Abbildung 19). Der Auswahlprozess wurde in einem Flow Chart gemäß PRISMA (Liberati et al., 2009; Moher, Liberati, Tetzlaff & Altman, 2009; Page et al., 2021) dokumentiert (Abbildung 20).

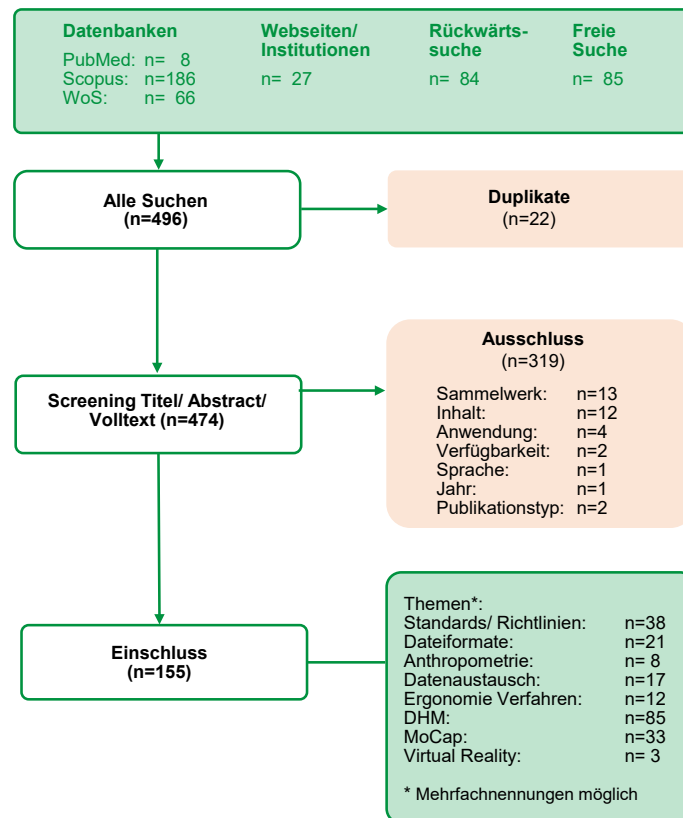


Abbildung 20 Flow Chart des Ablaufes der Suche und Selektion

Schritt 4 Datenextraktion und -verarbeitung

Zu den eingeschlossenen Studien in den Themenbereichen Dateiformate, Datenaustausch, DHM und MoCap wurden die Informationen zu den drei Schlüsselementen Data (D); Models (M) und Outcomes (O) extrahiert:

- Data: in der Publikation berichtete Dateiformate, Schnittstellen
- Methods: in der Studie eingesetzte DHM, MoCap Systeme
- Outcome: in der Studie angewandte ergonomische Verfahren.

Schritt 5 Zusammenstellung, Synopse und Bericht der Ergebnisse

Die eingeschlossenen Studien und extrahierten Informationen wurden in diesem Bericht beschrieben.

Identifizierte Quellen

Übersichtsarbeiten

- Bonin, D., Wischniewski, S., Wirsching, H.-J., Upmann, A., Rausch, J. & Paul, G. E. (2014). Exchanging data between digital human modeling systems - A review of data formats. In 3rd International Digital Human Modeling Symposium.
- Bubb, H. (2019). Why do we need digital human models? In S. Scataglini & G. E. Paul (Hrsg.), DHM and Posturography (S. 7–32). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00002-7>
- Da Silva, A. G., Gomes, M. V. M. & Winkler, I. (2022). Virtual reality and digital human modeling for ergonomic assessment in industrial product development: A patent and literature review. Applied Sciences (Switzerland), 12(3). <https://doi.org/10.3390/app12031084>
- Demirel, H. O., Ahmed, S. & Duffy, V. G. (2022). Digital human modeling: A review and reappraisal of origins, present, and expected future methods for representing humans computationally. International Journal of Human-Computer Interaction, 38(10), 897–937. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1976507>
- Current trends in research and application of digital human modeling. In Black (Hrsg.), Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021) (Lecture Notes in Networks and Systems, 1st ed., Bd. 223, S. 358–366) [S.I.]: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74614-8_44
- Keyvani, A., Lämkuil, D., Bolmsjö, G. & Örtengren, R. (2013). Considerations for aggregation of motion-captured files in structured databases for DHM applications. In 2nd International Digital Human Modeling Symposium.
- Mochimaru, M. (2017). Digital human models for human-centered design. Journal of Robotics and Mechatronics, 29(5), 783–789. <https://doi.org/10.20965/jrm.2017.p0783>
- Mochimaru, M. (2019). Standards and norms. In S. Scataglini & G. E. Paul (Eds.), DHM and Posturography (pp. 659–661). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00050-7>
- Mühlstedt, J. (2016). Digitale Menschmodelle. In A. C. Bullinger-Hoffmann & J. Mühlstedt (Hrsg.), Homo sapiens digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschenmodelle (S. 73–182). Springer Vieweg.
- Patel, T., Sanjog, J. & Karmakar, S. (2016). Ergonomics perspective in agricultural research: A user-centred approach using CAD and digital human modeling (DHM) technologies. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 97(3), 333–342. <https://doi.org/10.1007/s40030-016-0162-2>
- Paul, G. E. (2021). Modelling and Simulation of Human Systems. In G. Salvendy & W. Karwowski (Hrsg.), Handbook of Human Factors and Ergonomics (Bd. 153, S. 704–735). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119636113.ch27>
- Paul, G. E. & Wischniewski, S. (2012). Standardisation of digital human models. Ergonomics, 55(9), 1115–1118. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.690454>
- Peters, M., Wischniewski, S. & Paul, G. E. (2019). DHM data exchange protocols. In S. Scataglini & G. E. Paul (Hrsg.), DHM and Posturography (S. 663–670). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00051-9>
- Regazzoni, D. & Rizzi, C. (2019). Virtualization of the human in the digital factory. In R. S. Kenett, R. S. Swarz & A. Zonnenshain (Hrsg.), Systems Engineering in the Fourth Industrial Revolution (S. 161–189). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119513957.ch7>
- Wegner, D., Chiang, J., Kemmer, B., Lämkuil, D. & Roll, R. (2007). Digital human modeling requirements and standardization. In SAE Technical Paper Series (SAE Technical Paper Series). SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States.
- Zhu, W., Fan, X. & Zhang, Y. (2019). Applications and research trends of digital human models in the manufacturing industry. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 1(6), 558–579. <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2019.09.005>

Beschreibung von Dateiformaten

Acclaim Advanced Technologies Group. (1994). Internal technical memo #39 [online], Acclaim Advanced Technologies Group. Verfügbar unter: <http://www.darwin3d.com/gamedev/acclaim.zip>

- AUTODESK. (2013). FBX SDK programmer's guide, AUTODESK. Verfügbar unter: <http://docs.autodesk.com/FBX/2014/ENU/FBX-SDK-Documentation/>
- Blender. (2013). FBX binary file format specification, Blender. Verfügbar unter: <https://code.blender.org/2013/08/fbx-binary-file-format-specification/>
- Ciobota, N.D. (2012). Standard tessellation language in rapid prototyping technology. *The Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics*, 10(7). Verfügbar unter: https://fsim.valahia.ro/sbmm.html/docs/2012/mechanics/4_Ciobota_2012.pdf
- ISO/IEC CD, 19777-3 (under development). Information technology — Computer graphics and image processing — Extensible 3D (X3D) language bindings — Part 3: Part 3: C.
- ISO/IEC, 19777-1 (2006). Information technology — Computer graphics and image processing — Extensible 3D (X3D) language bindings — Part 1: ECMAScript.
- ISO/IEC, 19777-2 (2006). Information technology — Computer graphics and image processing — Extensible 3D (X3D) language bindings — Part 2: Java.
- ISO/PAS, 17506 (2012). Industrial automation systems and integration — COLLADA digital asset schema specification for 3D visualization of industrial data.
- ISO/IEC, 19775-1 (2013). Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) — Part 1: Architecture and base components.
- ISO/IEC, 19775-2 (2015). Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) — Part 2: Scene access interface (SAI).
- ISO/IEC, 19776-1 (2015). Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) encodings — Part 1: Extensible Markup Language (XML) encoding.
- ISO/IEC, 19776-2 (2015). Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) encodings — Part 2: Classic VRML encoding.
- ISO/IEC, 19776-3 (2015). Information technology - Computer graphics, image processing and environmental data representation - Extensible 3D (X3D) encodings - Part 3: Compressed binary encoding.
- ISO, 10303-1 (2021). Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles.
- Khronos Group. (2008). COLLADA – Digital Asset Schema Release 1.5.0, Khronos Group. Verfügbar unter: https://www.khronos.org/files/collada_spec_1_5.pdf
- Luciani, A., Evrard, M., Couroussé, D., Castagné, N., Cadoz, C. & Florens, J.L. (2010). A basic gesture and motion format for virtual reality multisensory applications. Verfügbar unter: https://www.academia.edu/6722311/A_basic_gesture_and_motion_format_for_virtual_reality_multisensory_applications <https://doi.org/10.48550/arXiv.1005.4564>
- Menache, A. (2011). The motion data. In A. Menache (Hrsg.), *Understanding Motion Capture for Computer Animation* (2nd ed.) (S. 135–185). Morgan Kaufmann Publishers. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381496-8.00004-4>
- Meredith, M. & Maddock, S. (2001). Motion capture file formats explained. Verfügbar unter: https://staffwww.dcs.shef.ac.uk/people/S.Maddock/phd_theses/meredith/MeredithMaddock2001_CS0111.pdf
- Motion Lab Systems. (2008). The C3D file format user guide, Motion Lab Systems. Verfügbar unter: https://www.c3d.org/docs/C3D_User_Guide_2008.pdf
- Müller, M., Röder, T. & Clausen, M. (2007). Documentation mocap database HDM05 (Computer Graphics Technical Reports CG-2007-2). Universität Bonn. Verfügbar unter: <https://resources.mpi-inf.mpg.de/HDM05/index.html>
- Nasr, E. A. & Kamrani, A. (2006). IGES standard protocol for feature recognition CAD system. In A. Kamrani & E. A. Nasr (Hrsg.), *Rapid Prototyping (Manufacturing Systems Engineering Series, Bd. 6, S. 25–62)*. Boston: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-387-23291-5_2
- Object Files (.obj). (2019). Verfügbar unter: https://web.archive.org/web/20190802111100/https://www.cs.utah.edu/~boulos/cs3505/obj_spec.pdf

Standards und Richtlinien

Baltzopoulos, V. (2021). Inverse dynamics, joint reaction forces and loading in the musculoskeletal system: guidelines for correct mechanical terms and recommendations for accurate reporting of results. *Sports Biomechanics*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1841826>

DIN EN ISO, 6385 (2004). Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2004); Deutsche Fassung EN ISO 6385:2004. Berlin: Beuth Verlag.

DIN, 33402-1 (2008-03). Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 1: Begriffe, Messverfahren.

DIN EN ISO, 15536-1 (2008-12). Ergonomie - Computer-Manikins und Körperumriss-Schablonen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.

DIN EN ISO, 15535 (2013-01). Allgemeine Anforderungen an die Einrichtung anthropometrischer Datenbanken.

DIN-ISO, 14289 (2016-12). Dokumentenmanagementanwendungen - Verbesserung der Barrierefreiheit für das Dateiformat von elektronischen Dokumenten: Beuth.

DIN EN ISO, 7250-1 (2017-12). Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung - Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte.

DIN EN, 20685-1 (2019-03). 3D-Scanverfahren für international kompatible anthropometrische Datenbanken - Teil 1: Prüfprotokoll für aus 3D-Scans extrahierte Körpermaße.

DIN, 33402-2 (2020-12). Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte.

Gebhardt, H., Schäfer, A. & Lang, K.-H. (2009). Anthropometrische Daten in Normen - Bestandsaufnahme und Bedarfsanalyse unter besonderer Berücksichtigung des Arbeitsschutzes (KAN-Bericht 44).

ISO/CD, 7250-4 (under development). Basic human body measurements for technological design — Part 4: Part 4: Expected performance of skilled anthropometrists.

ISO/IEC, 19777-1 (2006). Information technology — Computer graphics and image processing — Extensible 3D (X3D) language bindings — Part 1: ECMAScript.

DIN EN ISO, 15536-2 (2007-3). Ergonomie - Computer-Manikins und Körperumriss-Schablonen - Teil 2: Prüfung der Funktionen und Validierung der Maße von Computer-Manikin-Systemen.

ISO/TR, 7250-2 (2010). Basic human body measurements for technological design — Part 2: Statistical summaries of body measurements from national populations.

ISO/PAS, 17506 (2012). Industrial automation systems and integration — COLLADA digital asset schema specification for 3D visualization of industrial data.

ISO/IEC, 19775-1 (2013). Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) — Part 1: Architecture and base components.

ISO, 7250-3 (2015). Basic human body measurements for technological design — Part 3: Worldwide and regional design ranges for use in product standards.

ISO/IEC, 19776-2 (2015). Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) encodings — Part 2: Classic VRML encoding.

ISO/IEC, 19776-3 (2015). Information technology - Computer graphics, image processing and environmental data representation - Extensible 3D (X3D) encodings - Part 3: Compressed binary encoding.

ISO, 10303-21 (2016). Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure.

ISO, 14306 (2017). Industrial automation systems and integration — JT file format specification for 3D visualization.

ISO, 8559 (2017). Size designation of clothes — Part 1: Anthropometric definitions for body measurement.

ISO, 8559-2 (2017). Size designation of clothes — Part 2: Primary and secondary dimension indicators.

ISO, 14306 (2017-11). Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Spezifikation für das Dateiformat JT für die 3D-Visualisierung.

ISO/IEC, 19774-1 (2019-11). Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Part 1: Humanoid animation (HAnim) architecture.

ISO/IEC, 19774-2 (2019-11). Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Part 2: Humanoid animation (HAnim) motion data animation.

ISO, 10303-1 (2021). Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles.

Mochimaru, M. (2019). Standards and norms. In S. Scataglini & G. E. Paul (Eds.), *DHM and Posturography* (pp. 659–661). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00050-7>

Paul, G. E. & Wischniewski, S. (2012). Standardisation of digital human models. *Ergonomics*, 55(9), 1115–1118. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.690454>

Peters, M., Wischniewski, S. & Paul, G. E. (2019). DHM data exchange protocols. In S. Scataglini & G. E. Paul (Hrsg.), *DHM and Posturography* (S. 663–670). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00051-9>

VDI, 4499-4 (2015). *Digitale Fabrik - Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik*. Berlin: Beuth Verlag.

Web 3D Consortium. X3D graphics for advanced modeling. Humanoid Animation (H-Anim). Verfügbar unter: <https://x3dgraphics.com/slidesets/X3dForAdvancedModeling/HumanoidAnimation.pdf>

Wegner, D., Chiang, J., Kemmer, B., Lämkuhl, D. & Roll, R. (2007). Digital human modeling requirements and standardization. In *SAE Technical Paper Series (SAE Technical Paper Series)*. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States. Verfügbar unter: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2007-01-2498/>

Wu, G. & Cavanagh, P. R. (1995). ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, 28(10), 1257–1261. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(95\)00017-C](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00017-C)

Wu, G., Siegler, S., Allard, P., Kirtley, C., Leardini, A., Rosenbaum, D. et al. (2002). ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I: ankle, hip, and spine. *Journal of Biomechanics*, 35(4), 543–548. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(01\)00222-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(01)00222-6)

Wu, G., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J. (. J.), Makhsous, M., van Roy, P., Anglin, C. et al. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5), 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.042>

Zülch, G. (2013). *Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik – Die neue VDI-Richtlinie 4499-4*. Zugriff am 23.08.2022. Verfügbar unter: http://www.asim-fachtagung-spl.de/asim2013/papers/Proof_165_Zuelch.pdf

Datenaustausch

Aberman, K., Li, P., Lischinski, D., Sorkine-Hornung, O., Cohen-Or, D. & Chen, B. (2020). Skeleton-aware networks for deep motion retargeting. *ACM Transactions on Graphics*, 39(4). <https://doi.org/10.1145/3386569.3392462>

Alexander, N., Schwameder, H., Baker, R. & Trinler, U. (2021). Effect of different walking speeds on joint and muscle force estimation using AnyBody and OpenSim. *Gait & Posture*, 90, 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.08.026>

Bonin, D., Wischniewski, S., Wirsching, H.J., Upmann, A., Rausch, J. & Paul, G. E. (2014). Exchanging data between digital human modeling systems - A review of data formats. In *3rd International Digital Human Modeling Symposium*. Verfügbar unter: <https://eprints.qut.edu.au/66306/>

Deuse, J., Grötsch, A., Stankiewicz, L. & Wischniewski, S. (2016). A customizable digital human model for assembly system design. In C. Schlick & S. Trzcieliński (Hrsg.), *AHFE 2016 International Conference. Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future* (Bd. 490). https://doi.org/10.1007/978-3-319-41697-7_16

Ehrig, R. M., Taylor, W. R., Duda, G. N. & Heller, M. O. (2006). A survey of formal methods for determining the centre of rotation of ball joints. *Journal of Biomechanics*, 39(15), 2798–2809. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.10.002>

ISO, 10303-21 (2016). Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure.

Jung, M., Damsgaard, M., Andersen, M. S. & Rasmussen, J. (2013). Integrating biomechanical manikins into a CAD environment. In 2nd International Digital Human Modeling Symposium. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/263505284_Integrating_Biomechanical_Manikins_into_a_CAD_Environment

Keyvani, A., Lämkuil, D., Bolmsjö, G. & Örtengren, R. (2013). Considerations for aggregation of motion-captured files in structured databases for DHM applications. In 2nd International Digital Human Modeling Symposium. Verfügbar unter: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/206060/local_206060.pdf

Krüger, D. & Wartzack, S. (2014). Towards CAD integrated simulation of use under ergonomic aspects. In International Design Conference - Design 2014 (S. 2095–2104). Verfügbar unter: <https://www.designsociety.org/download-publication/35350/TOWARDS+CAD+INTEGRATED+SIMULATION+OF+USE+UNDER+ERGONOMIC+ASPECTS>

Monzani, J.S., Baerlocher, P., Boulic, R. & Thalmann, D. (2000). Using an intermediate skeleton and inverse kinematics for motion retargeting. *Computer Graphics Forum*, 19(3), 11–19. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00393>

Paul, G. E. & Lee, W. C. (2011). Interfacing Jack and Anybody: Towards anthropometric musculoskeletal digital human modeling. In X. Wang & H. Bubb (Hrsg.), *First International Symposium on Digital Human Modeling*. Verfügbar unter: <https://eprints.qut.edu.au/49085/>

Paul, G. E. & Wischniewski, S. (2012). Standardisation of digital human models. *Ergonomics*, 55(9), 1115–1118. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.690454>

Peters, M., Quadrat, E., Nolte, A., Wolf, A., Miehl, J., Wartzack, S. et al. (2018). Biomechanical Digital Human Models: Chances and Challenges to Expand Ergonomic Evaluation. In *International Conference on Human Systems Engineering and Design 2018* (Bd. 876). https://doi.org/10.1007/978-3-030-02053-8_134

Peters, M. & Wischniewski, S. (2020). Evaluation of physical workload using simulation versus motion capturing data for biomechanical models. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 380–387. <https://doi.org/10.3233/ATDE200046>

SomaDynamics. (2022, 6. Oktober). API Projects: SomaKin. Zugriff am 06.10.2022. Verfügbar unter: <https://www.somadynamics.com.au/api-projects.html>

Terlemez, Ö., Ulbrich, S., Mandery, C., Do, M., Vahrenkamp, N. & Asfour, T. (2014). Master motor map (MMM) – framework and toolkit for capturing, representing, and reproducing human motion on humanoid robots. Verfügbar unter: https://www.academia.edu/15081869/Master_Motor_Map_MMM_Framework_and_Toolkit_for_Capturing_Representing_and_Reproducing_Human_Motion_on_Humanoid_Robots <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2014.7041470>

Ulherr, A. & Bengler, K. (2016). Umfassende Diskomfortbewertung für Autoinsassen durch Simulation: UDASim : Schlussbericht zum durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme KMU-innovativ: IKT geförderte Verbundprojekt : Projektlaufzeit: 01.07.2013-30.09.2016. Umfassende Diskomfortbewertung für Autoinsassen durch Simulation. <https://doi.org/10.2314/GBV:888737955>

Identifizierte Fragestellungen für mögliche weiterführende Forschung

Die künftigen Merkmale von Human Factors and Ergonomics (HFE) lassen sich sechs Haupttrends zuordnen: (1) globaler Wandel der Arbeitssysteme, (2) kulturelle Vielfalt, (3) Alterung, (4) Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT), (5) erhöhte Wettbewerbsfähigkeit und Innovationsbedarf, (6) Nachhaltigkeit und soziale Verantwortung der Unternehmen. Aus einem Literatur- und Internet-Review haben T. Alexander und Paul (2014) abgeleitet, dass DHM bereits eine breite Funktionalität zur Unterstützung der Trends (2) und (3) und begrenzte Optionen in Bezug auf Trend (1) bieten. Die **wachsende Bedeutung von IKT (4), der Bedarf an Innovation (5) und Nachhaltigkeit (6)** werden jedoch in erster Linie aus einer hardwareorientierten technischen Perspektive betrachtet und nicht in DHM wiedergespiegelt, was eine anhaltende Trennung zwischen Hardware-Design (Ingenieurwesen) und Software-Design (Informationstechnologie) aus Sicht der DHM zeigt.

Eine wichtige Funktion, die dem ergonomischen DHM hinzugefügt werden wird, ist die **Modellierung der Kognition**. Das menschliche Verhalten bei Fertigungsprozessen hat einen erheblichen Einfluss auf die Produktionseffizienz, was weitere Untersuchungen erfordert. Daher werden kognitive DHM in Fertigungsprozesse eingeführt, um realistischere Fertigungsumgebungen zu schaffen (Zhu et al., 2019). Virtuelle Simulation und DHM gelten auch als Schlüsseltechnologien für die Untersuchung der Zusammenarbeit von Menschen und Robotern, die ein wichtiger Trend in der Fertigungsindustrie ist.

Darüber hinaus scheinen mehrere DHM-Systeme das Rad neu erfunden zu haben, indem sie Lösungen aus anderen Anwendungsbereichen duplizieren oder neu formulieren. Eine mögliche Lösung für dieses Problem wäre die **Definition von Schnittstellen oder eines gemeinsamen Standards für den Informationsaustausch zwischen verschiedenen DHM**, basierend auf den speziellen Anforderungen der jeweiligen Anwendung (T. Alexander & Paul, 2014).

Da Silva et al. (2022) und Hanson et al. (2022) haben festgestellt, dass **virtuelle Realität und digitale Menschmodellierung** derzeit nur selten in derselben Ergonomieanalyse kombiniert werden, obwohl in der Literatur ein relativer Konsens über die vielen Vorteile der Integration von virtueller Realität und digitaler Menschmodellierung zur Bewertung der physischen Ergonomie in den frühen Phasen der Produktentwicklung besteht. Sie schlagen weitere Untersuchungen über eine mögliche Lücke zwischen den Erwartungen der Forscher, dass die virtuelle Realität ein aktueller Trend in der digitalen Menschmodellierung ist, und der tatsächlichen Anwendung der Technologien in diesem Bereich vor.

Zusätzlich zu den Funktionen zur Vorhersage von Körperhaltung und Bewegung sollten DHM die Leistungszeit, Beschwerden, Ermüdung und weitergehende biomechanische Stressoren für **bestimmte Bevölkerungsgruppen (z. B. ältere Menschen, Kinder) und Menschen mit Behinderungen** genau vorhersagen (Demirel et al., 2022). Das Ziel der digitalen Menschenmodellierung verlagert sich von der normalen Bevölkerung auf Menschen mit besonderen Bedürfnissen. Dies beschränkt sich nicht nur auf die Darstellung eines Rollstuhlfahrers, sondern auch auf die Darstellung von Funktionen des Bewegungsumfanges, der Gelenkkraft und des Blickfelds von Menschen mit besonderen Bedürfnissen. Weitere Forschungsarbeiten sollten sich auf die Modellierung von Spastik, Bewegungseinschränkungen und Funktionen der Sehschwäche konzentrieren (Mochimaru, 2017). Weiterhin richten sich die Forschungsanstrengungen auf die Implementierung von Modellen, die in der Lage sind, übergewichtige Menschen darzustellen (Regazzoni & Rizzi, 2019).

Literaturverzeichnis

- Aberman, K., Li, P., Lischinski, D., Sorkine-Hornung, O., Cohen-Or, D. & Chen, B. (2020). Skeleton-aware networks for deep motion retargeting. *ACM Transactions on Graphics*, 39(4). <https://doi.org/10.1145/3386569.3392462>
- Alexander, N., Schwameder, H., Baker, R. & Trinler, U. (2021). Effect of different walking speeds on joint and muscle force estimation using AnyBody and OpenSim. *Gait & Posture*, 90, 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.08.026>
- Alexander, T. & Paul, G. (2014). Ergonomic DHM systems - limitations and trends – a review focused on the ‘future of ergonomics’. In *3rd International Digital Human Modeling Symposium*. Verfügbar unter: <https://eprints.qut.edu.au/64880/>
- Arksey, H. & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Asadi, F. & Arjmand, N. [N.]. (2020). Marker-less versus marker-based driven musculoskeletal models of the spine during static load-handling activities. *Journal of Biomechanics*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.110043>
- AUTODESK. (2013). *FBX SDK programmer's guide*, AUTODESK. Verfügbar unter: <http://docs.autodesk.com/FBX/2014/ENU/FBX-SDK-Documentation/>
- Azad, P., Asfour, T. & Dillmann, R. (2007). Toward an unified representation for imitation of human motion on humanoids. In *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision* (S. 2558–2563). Verfügbar unter: <https://h2t.anthropomatik.kit.edu/pdf/Azad2007c.pdf>
- Babicsné Horváth, M. & Hercegfı, K. (2019). Early results of a usability evaluation of two digital human model-based ergonomic software applying eye-tracking methodology comparison of the usability of ViveLab and Jack software. In *2019 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)* (pp. 205–210). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9089993>
- Behjati, M. & Arjmand, N. [Navid]. (2019). Biomechanical assessment of the NIOSH lifting equation in asymmetric load-handling activities using a detailed musculoskeletal model. *Human Factors*, 61(2), 191–202. <https://doi.org/10.1177/0018720818795038>
- Blender. (2013). *FBX binary file format specification*, Blender. Verfügbar unter: <https://code.blender.org/2013/08/fbx-binary-file-format-specification/>
- Bonin, D., Ackermann, A., Radke, D., Peters, M. & Wischniewski, S. (2022). Anthropometric dataset for the German working-age population using 3D body scans from a regional epidemiological health study and a weighting algorithm. *Ergonomics*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2130440>
- Bonin, D., Wischniewski, S., Wirsching, H.-J., Upmann, A., Rausch, J. & Paul, G. E. (2014). Exchanging data between digital human modeling systems - A review of data formats. In *3rd International Digital Human Modeling Symposium*. Verfügbar unter: <https://eprints.qut.edu.au/66306/>
- Bragge, P., Clavisi, O., Turner, T., Tavender, E., Collie, A. & Gruen, R. L. (2011). The Global Evidence Mapping Initiative: scoping research in broad topic areas. *BMC Medical Research Methodology*, 11, 92. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-11-92>
- Bubb, H. (2019). Why do we need digital human models? In S. Scataglini & G. E. Paul (Hrsg.), *DHM and Posturography* (S. 7–32). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00002-7>
- Bullinger-Hoffmann, A. C. & Mühlstedt, J. (Hrsg.). (2016). *Homo sapiens digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschenmodelle*: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50459-8>
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Hrsg.). (2014). *Leitfaden für die Erarbeitung von Scoping Reviews*. Zugriff am 20.08.2014. Verfügbar unter: www.baua.de/dok/5200068
- Caporaso, T., Di Gironimo, G., Tarallo, A., Martino, G. de, Di Ludovico, M. & Lanzotti, A. (2017). Digital human models for gait analysis: Experimental validation of static force analysis tools under dynamic conditions. In B. Eynard, V. Nigrelli, S. M. Oliveri, G. Peris-Fajarnes & S. Rizzuti (Hrsg.),

- Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-45781-9_48
- Centre for Evidence-based Conservation. (2010). Guidelines for Systematic Reviews in Environmental Management. Version 4.2 March 2013. Zugriff am 20.08.2014.
- Centre for Reviews and Dissemination. (2009). *Systematic Reviews: CRD's guidance for undertaking reviews in health care*. Zugriff am 20.08.2014.
- Chang, J., Chablat, D., Bennis, F. & Ma, L. (2017). *Muscle fatigue analysis using opensim* (10286 LNCS). https://doi.org/10.1007/978-3-319-58463-8_9
- Choi, N.-C. & Lee, S. H. (2015). Discomfort evaluation of truck ingress/egress motions based on bio-mechanical analysis. *Sensors*, 15(6), 13568–13590. <https://doi.org/10.3390/s150613568>
- Ciobota, N.-D. (2012). Standard tessellation language in rapid prototyping technology. *The Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics*, 10(7). Verfügbar unter: https://fsim.valahia.ro/sbmm.html/docs/2012/mechanics/4_Ciobota_2012.pdf
- Da Silva, A. G., Gomes, M. V. M. & Winkler, I. (2022). Virtual reality and digital human modeling for ergonomic assessment in industrial product development: A patent and literature review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/app12031084>
- Daudt, H. M., van Mossel, C. & Scott, S. J. (2013). Enhancing the scoping study methodology: a large, inter-professional team's experience with Arksey and O'Malley's framework. *BMC Medical Research Methodology*, 13(48). <https://doi.org/10.1186/1471-2288-13-48>
- Demirel, H. O., Ahmed, S. & Duffy, V. G. (2022). Digital human modeling: A review and reappraisal of origins, present, and expected future methods for representing humans computationally. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 38(10), 897–937. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1976507>
- Deuse, J., Grötsch, A., Stankiewicz, L. & Wischniewski, S. (2016). A customizable digital human model for assembly system design. In C. Schlick & S. Trzcieleński (Hrsg.), *AHFE 2016 International Conference. Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future* (Bd. 490). https://doi.org/10.1007/978-3-319-41697-7_16
- DIN EN ISO, 6385 (2004). *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2004); Deutsche Fassung EN ISO 6385:2004*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN, 33402-1 (2008-03). *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 1: Begriffe, Messverfahren*.
- DIN EN ISO, 15536-1 (2008-12). *Ergonomie - Computer-Manikins und Körperumrisschablonen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*.
- DIN EN ISO, 15535 (2013-01). *Allgemeine Anforderungen an die Einrichtung anthropometrischer Datenbanken*.
- DIN EN ISO, 7250-1 (2017-12). *Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung - Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte*.
- DIN EN, 20685-1 (2019-03). *3D-Scanverfahren für international kompatible anthropometrische Datenbanken - Teil 1: Prüfprotokoll für aus 3D-Scans extrahierte Körpermaße*.
- DIN, 33402-2 (2020-12). *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*.
- Duffy, V. G. (Hrsg.). (2009). *Handbook of digital human modeling. Research for applied ergonomics and human factors engineering* (Human factors and ergonomics). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420063523>
- Ehrig, R. M., Taylor, W. R., Duda, G. N. & Heller, M. O. (2006). A survey of formal methods for determining the centre of rotation of ball joints. *Journal of Biomechanics*, 39(15), 2798–2809. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.10.002>
- European Food Safety Authority. (2010). Application of systematic review methodology to food and feed safety assessments to support decision making. *EFSA Journal*, 8(6), 1637. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1637>
- Fonk, R., Schneeweiss, S., Simon, U. & Engelhardt, L. (2021). Hand motion capture from a 3D leap motion controller for a musculoskeletal dynamic simulation. *Sensors*, 21(4). <https://doi.org/10.3390/s21041199>
- Geiger, A., Brandenburg, E. & Stark, R. (2020). Natural virtual reality user interface to define assembly sequences for digital human models. *Applied System Innovation*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/asi3010015>

- Godin, K., Stapleton, J., Kirkpatrick, S. I., Hanning, R. M. & Leatherdale, S. T. (2015). Applying systematic review search methods to the grey literature: a case study examining guidelines for school-based breakfast programs in Canada. *Systematic Reviews*, 4, 138. <https://doi.org/10.1186/s13643-015-0125-0>
- Hamner, S. R., Seth, A. & Delp, S. L. (2010). Muscle contributions to propulsion and support during running. *Journal of Biomechanics*, 43(14), 2709–2716. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.06.025>
- Hanson, L., Högberg, D., Brolin, E., Billing, E., Pascual, A. I. & Lamb, M. (2022). Current trends in research and application of digital human modeling. In Black (Hrsg.), *Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)* (Lecture Notes in Networks and Systems, 1st ed., Bd. 223, S. 358–366) [S.I.]: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74614-8_44
- Hermisdorf, H., Hofmann, N. & Keil, A. (2016). Bewertung digital erfasster Bewegungen mit Dynamiscus. In A. C. Bullinger-Hoffmann & J. Mühlstedt (Hrsg.), *Homo sapiens digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschenmodelle* (S. 329–336). Springer Vieweg. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-50459-8_17
- Hidalgo Landa, A., Szabo, I., Le Brun, L., Owen, I. & Fletcher, G. (2011). An Evidence-Based Approach to Scoping Reviews. *The Electronic Journal Information Systems Evaluation*, 14(1), 46–52. Zugriff am 21.08.2014. Verfügbar unter: <http://www.ejise.com/volume14/issue1>
- The Cochrane Collaboration (Higgins, J. P. & Green, S., Hrsg.). (2011). *Cochrane Handbook for systematic Reviews of Interventions. Version 5.1.0 [updated March 2011]*, The Cochrane Collaboration. Verfügbar unter: <http://handbook.cochrane.org/>
- Hoffmann, S., Vries, R. B. M. de, Stephens, M. L., Beck, N. B., Dirven, H. A. A. M., Fowle, J. R. et al. (2017). A primer on systematic reviews in toxicology. *Archives of Toxicology*, 91(7), 2551–2575. <https://doi.org/10.1007/s00204-017-1980-3>
- ISO/IEC CD, 19777-3 (under development). *Information technology — Computer graphics and image processing — Extensible 3D (X3D) language bindings — Part 3: Part 3: C.*
- ISO/IEC, 19777-1 (2006). *Information technology — Computer graphics and image processing — Extensible 3D (X3D) language bindings — Part 1: ECMAScript.*
- ISO/IEC, 19777-2 (2006). *Information technology — Computer graphics and image processing — Extensible 3D (X3D) language bindings — Part 2: Java.*
- DIN EN ISO, 15536-2 (2007-3). *Ergonomie - Computer-Manikins und Körperumriss-Schablonen - Teil 2: Prüfung der Funktionen und Validierung der Maße von Computer-Manikin-Systemen.*
- ISO/PAS, 17506 (2012). *Industrial automation systems and integration — COLLADA digital asset schema specification for 3D visualization of industrial data.*
- ISO/IEC, 19775-1 (2013). *Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) — Part 1: Architecture and base components.*
- ISO/IEC, 19775-2 (2015). *Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) — Part 2: Scene access interface (SAI).*
- ISO/IEC, 19776-1 (2015). *Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) encodings — Part 1: Extensible Markup Language (XML) encoding.*
- ISO/IEC, 19776-2 (2015). *Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Extensible 3D (X3D) encodings — Part 2: Classic VRML encoding.*
- ISO/IEC, 19776-3 (2015). *Information technology - Computer graphics, image processing and environmental data representation - Extensible 3D (X3D) encodings - Part 3: Compressed binary encoding.*
- ISO, 10303-21 (2016). *Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure.*
- ISO, 14306 (2017). *Industrial automation systems and integration — JT file format specification for 3D visualization.*

- ISO, 8559 (2017). *Size designation of clothes — Part 1: Anthropometric definitions for body measurement*.
- ISO/IEC, 19774-1 (2019-11). *Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Part 1: Humanoid animation (HAnim) architecture*.
- ISO/IEC, 19774-2 (2019-11). *Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Part 2: Humanoid animation (HAnim) motion data animation*.
- ISO, 10303-1 (2021). *Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles*.
- Jung, M., Damsgaard, M., Andersen, M. S. & Rasmussen, J. (2013). Integrating biomechanical manikins into a CAD environment. In *2nd International Digital Human Modeling Symposium*. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/263505284_Integrating_Biomechanical_Manikins_into_a_CAD_Environment
- Jürgens, H. W., Matzdorff, I. & Windberg, J. (1998). *Internationale anthropometrische Daten als Voraussetzung für die Gestaltung von Arbeitsplätzen und Maschinen* (Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse 108).
- Keyvani, A., Lämkuhl, D. [D.], Bolmsjö, G. & Örtengren, R. (2013). Considerations for aggregation of motion-captured files in structured databases for DHM applications. In *2nd International Digital Human Modeling Symposium*. Verfügbar unter: https://publications.lib.chalmers.se/records/full-text/206060/local_206060.pdf
- Khronos Group. (2008). *COLLADA – Digital Asset Schema Release 1.5.0*, Khronos Group. Verfügbar unter: https://www.khronos.org/files/collada_spec_1_5.pdf
- Kohl, C., Craig, W., Frampton, G., Garcia-Yi, J., van Herck, K., Kleter, G. A. et al. (2013). Developing a good practice for the review of evidence relevant to GMO risk assessment. *IOBC-WPRS Bulletin*, (97), 55–62. Zugriff am 25.08.2014.
- Kong, Y.-K., Choi, K.-H., Cho, M.-U., Kim, S.-Y., Kim, M.-J., Shim, J.-W. et al. (2022). Ergonomic assessment of a lower-limb exoskeleton through electromyography and Anybody modeling system. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13). <https://doi.org/10.3390/ijerph19138088>
- Krüger, D. & Wartzack, S. (2014). Towards CAD integrated simulation of use under ergonomic aspects. In *International Design Conference - Design 2014* (S. 2095–2104). Verfügbar unter: <https://www.designsociety.org/download-publication/35350/TOWARDS+CAD+INTEGRATED+SIMULATION+OF+USE+UNDER+ERGONOMIC+ASPECTS>
- Levac, D., Colquhoun, H. & O'Brien, K. K. (2010). Scoping studies: advancing the methodology. *Implementation Science : IS*, 5, 69. <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, John P A et al. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000100. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- Luciani, A., Evrard, M., Couroussé, D., Castagné, N., Cadoz, C. & Florens, J.-L. (2010). *A basic gesture and motion format for virtual reality multisensory applications*. Verfügbar unter: https://www.academia.edu/6722311/A_basic_gesture_and_motion_format_for_virtual_reality_multisensory_applications <https://doi.org/10.48550/arXiv.1005.4564>
- Menache, A. (2011). The motion data. In A. Menache (Hrsg.), *Understanding Motion Capture for Computer Animation (2nd ed.)* (S. 135–185). Morgan Kaufmann Publishers. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381496-8.00004-4>
- Meredith, M. & Maddock, S. (2001). *Motion capture file formats explained*. Verfügbar unter: https://staffwww.dcs.shef.ac.uk/people/S.Maddock/phd_theses/meredith/MeredithMaddock2001_CS0111.pdf
- Miake-Lye, I. M., Hempel, S., Shanman, R. & Shekelle, P. G. (2016). What is an evidence map? A systematic review of published evidence maps and their definitions, methods, and products. *Systematic Reviews*, 5(1), e1000326. <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0204-x>
- Mochimaru, M. (2017). Digital human models for human-centered design. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 29(5), 783–789. <https://doi.org/10.20965/jrm.2017.p0783>

- Mochimaru, M. (2019). Standards and norms. In S. Scataglini & G. E. Paul (Eds.), *DHM and Posturography* (pp. 659–661). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00050-7>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Monzani, J.-S., Baerlocher, P., Boulic, R. & Thalmann, D. (2000). Using an intermediate skeleton and inverse kinematics for motion retargeting. *Computer Graphics Forum*, 19(3), 11–19. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00393>
- Motion Lab Systems. (2008). *The C3D file format user guide*, Motion Lab Systems. Verfügbar unter: https://www.c3d.org/docs/C3D_User_Guide_2008.pdf
- Mühlstedt, J. (2016a). Digitale Menschmodelle. In A. C. Bullinger-Hoffmann & J. Mühlstedt (Hrsg.), *Homo sapiens digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschenmodelle* (S. 73–182). Springer Vieweg. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/digitale-menschmodelle/12179380>
- Mühlstedt, J. (2016b). Grundlagen virtueller Ergonomie. In A. C. Bullinger-Hoffmann & J. Mühlstedt (Hrsg.), *Homo sapiens digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschenmodelle* (S. 7–39). Springer Vieweg. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-50459-8_2
- Mühlstedt, J. (2016c). Virtuelle Ergonomie. In A. C. Bullinger-Hoffmann & J. Mühlstedt (Hrsg.), *Homo sapiens digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschenmodelle* (S. 183–225). Springer Vieweg. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-50459-8_5
- Müller, M., Röder, T. & Clausen, M. (2007). *Documentation mocap database HDM05* (Computer Graphics Technical Reports CG-2007-2). Universität Bonn. Verfügbar unter: <https://resources.mpi-inf.mpg.de/HDM05/index.html>
- Nasr, E. A. & Kamrani, A. (2006). IGES standard protocol for feature recognition CAD system. In A. Kamrani & E. A. Nasr (Hrsg.), *Rapid Prototyping* (Manufacturing Systems Engineering Series, Bd. 6, S. 25–62). Boston: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-387-23291-5_2
- Nimbarte, A. D., Sun, Y., Jaridi, M. & Hsiao, H. (2013). Biomechanical loading of the shoulder complex and lumbosacral joints during dynamic cart pushing task. *Applied Ergonomics*, 44(5), 841–849. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.02.008>
- Object Files (.obj)*. (2019). Verfügbar unter: https://web.archive.org/web/20190802111100/https://www.cs.utah.edu/~boulos/cs3505/obj_spec.pdf
- Offensive Mittelstand (Hrsg.). (2018). Personenbezogene digitale Ergonomie [Themenheft].
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D. et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4>
- Paul, G. E. & Lee, W. C. (2011). Interfacing Jack and Anybody: Towards anthropometric musculoskeletal digital human modeling. In X. Wang & H. Bubb (Hrsg.), *First International Symposium on Digital Human Modeling*. Verfügbar unter: <https://eprints.qut.edu.au/49085/>
- Paul, G. E. & Wischniewski, S. (2012). Standardisation of digital human models. *Ergonomics*, 55(9), 1115–1118. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.690454>
- Peters, M., Quadrat, E., Nolte, A., Wolf, A., Miehl, J. [Jörg], Wartzack, S. et al. (2018). Biomechanical digital human models: Chances and challenges to expand ergonomic evaluation. In *International Conference on Human Systems Engineering and Design 2018* (Bd. 876). https://doi.org/10.1007/978-3-030-02053-8_134
- Peters, M. & Wischniewski, S. (2020). Evaluation of physical workload using simulation versus motion capturing data for biomechanical models. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 380–387. <https://doi.org/10.3233/ATDE200046>
- Peters, M., Wischniewski, S. & Paul, G. E. (2019). DHM data exchange protocols. In S. Scataglini & G. E. Paul (Hrsg.), *DHM and Posturography* (S. 663–670). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816713-7.00051-9>
- Regazzoni, D. & Rizzi, C. (2019). Virtualization of the human in the digital factory. In R. S. Kenett, R. S. Swarz & A. Zonnenshain (Hrsg.), *Systems Engineering in the Fourth Industrial Revolution* (S. 161–189). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119513957.ch7>
- Sargeant, J. M., Amezcua, M. D. R., Rajic, A. & Waddell, L. (2005). *A Guide to Conducting Systematic Reviews in Agri-Food Public Health*. Zugriff am 21.08.2014.

- Schafer, M. (1994). *Internal technical memo #39 [online]*, Acclaim Advanced Technologies Group. Verfügbar unter: <http://www.darwin3d.com/gamedev/acclaim.zip>
- Seiferheld, B. (2021, 12. Januar). *Biomechanical investigation of a passive upper extremity exoskeleton for manual material handling - A computational parameter study*. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=HSsvjouKIQQ>
- Terlemez, Ö., Ulbrich, S., Mandery, C., Do, M., Vahrenkamp, N. & Asfour, T. (2014). *Master motor map (MMM) – framework and toolkit for capturing, representing, and reproducing human motion on humanoid robots*. Verfügbar unter: https://www.academia.edu/15081869/Master_Motor_Map_MMM_Framework_and_Toolkit_for_Capturing_Representing_and_Reproducing_Human_Motion_on_Humanoid_Robots <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2014.7041470>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D. et al. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Trinler, U. & Baker, R. (2018). Estimated landmark calibration of biomechanical models for inverse kinematics. *Medical Engineering & Physics*, 51, 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2017.10.015>
- Tröster, M., Budde, S., Maufroy, C., Andersen, M. S., Rasmussen, J., Schneider, U. et al. (2022). Biomechanical analysis of stoop and free-style squat lifting and lowering with a generic back-support exoskeleton model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph19159040>
- Tröster, M., Wagner, D. W., Müller-Graf, F., Maufroy, C., Schneider, U. & Bauernhansl, T. (2020). Biomechanical model-based development of an active occupational upper-limb exoskeleton to support healthcare workers in the surgery waiting room. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14). <https://doi.org/10.3390/ijerph17145140>
- U.S. Food and Drug Administration (U.S. Food and Drug Administration, Hrsg.). (2009). *Guidance for Industry: Evidence-Based Review System for the Scientific Evaluation of Health Claims - Final*. Verfügbar unter: <http://www.fda.gov/food/guidanceregulation/guidancedocumentsregulatoryinformation/labelingnutrition/ucm073332.htm>
- Ulherr, A. & Bengler, K. (2016). Umfassende Diskomfortbewertung für Autoinsassen durch Simulation : UDASim : Schlussbericht zum durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme KMU-innovativ: IKT geförderte Verbundprojekt : Projektlaufzeit: 01.07.2013-30.09.2016. *Umfassende Diskomfortbewertung für Autoinsassen durch Simulation*. <https://doi.org/10.2314/GBV:888737955>
- VDI, 4499-4 (2015). *Digitale Fabrik - Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik*. Berlin: Beuth Verlag.
- Walther, M. & Muñoz, B. T. (2012). Integration of time as a factor in ergonomic simulation. *Work*, 41, 4372–4375. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0732-4372>
- Wegner, D., Chiang, J., Kemmer, B., Lämkuhl, D. [Dan] & Roll, R. (2007). Digital human modeling requirements and standardization. In *SAE Technical Paper Series* (SAE Technical Paper Series). SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States. Verfügbar unter: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2007-01-2498/>
- Wischniewski, S. (2013). *Digitale Ergonomie 2025. Trends und Strategien zur Gestaltung gebrauchstauglicher Produkte und sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger sozio-technischer Arbeitssysteme* (1. Auflage). Dortmund.
- Wolf, A., Miehl, J. [J.] & Wartzack, S. (2020). Challenges in interaction modelling with digital human models—A systematic literature review of interaction modelling approaches. *Ergonomics*, 1442–1458. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1786606>
- Wu, G. & Cavanagh, P. R. (1995). ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, 28(10), 1257–1261. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(95\)00017-C](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00017-C)
- Wu, G., Siegler, S., Allard, P., Kirtley, C., Leardini, A., Rosenbaum, D. et al. (2002). ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I: ankle, hip, and spine. *Journal of Biomechanics*, 35(4), 543–548. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(01\)00222-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(01)00222-6)

- Wu, G., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J. (. J., Makhsous, M., van Roy, P., Anglin, C. et al. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion - Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5), 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.042>
- Zhong, J., Weistroffer, V., Maurice, P., Andriot, C. & Colas, F. (2022). Interacting with a torque-controlled virtual human in virtual reality for ergonomics studies. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* (pp. 678–679). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9757552>
- Zhou, J. (2020, 1. Dezember). *Physical stresses on caregivers when repositioning patients in bed*. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=knOfERwrBbl>
- Zhu, W., Fan, X. & Zhang, Y. (2019). Applications and research trends of digital human models in the manufacturing industry. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(6), 558–579. <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2019.09.005>
- Zülch, G. (2013). Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik – Die neue VDI-Richtlinie 4499-4. Zugriff am 23.08.2022. Verfügbar unter: http://www.asim-fachtagung-spl.de/asim2013/papers/Proof_165_Zuelch.pdf